



Université de Liège
Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à diverses échelles spatiales pour la gestion de l'agriculture irriguée en Afrique de l'Ouest

Joost WELLENS

Thèse présentée en vue de l'obtention
du grade de Docteur en Sciences

Mars 2014

Composition du jury :

Président : Pr Francis Rosillon (ULg)
Promoteur : Pr Bernard Tychon (ULg)
Co-promoteur : Pr Dirk Raes (K.U.Leuven)
Lecteurs : Dr Serge Brouyère (ULg)
Ir Johan Derouane (DGARE/SPW)
Dr Bakary Djaby (ICRISAT)
Dr René Gommès (CAS/IRSA)

Année Académique 2013-2014

Avec l'appui de :



LA COOPÉRATION
BELGE AU DÉVELOPPEMENT







Université de Liège
Faculté des Sciences
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à diverses échelles spatiales pour la gestion de l'agriculture irriguée en Afrique de l'Ouest

Version originale : Wellens, J., 2014. A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in semi-arid West-Africa. Ph.D. dissertation. Université de Liège, Liège, Belgium. 106 p.

Edité par : Wellens, J., Traoré, F. et Nitchou, M., 2014.

Traduit par : Sanou, T.



Réalisé sur financement de Wallonie-Bruxelles International et Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger dans le cadre du projet 'Renforcement des capacités à concevoir et à mettre en œuvre des outils opérationnels de gestion de l'eau à usage agricole' (www.ge-eau.org).

Résumé

Le bassin du Kou, situé dans le sud-ouest du Burkina Faso, est depuis quelques décennies le théâtre de différentes formes de conflits liés à toute une série de problèmes que l'on rencontre généralement dans des zones irriguées. Dans le bassin du Kou, les aménagements hydro-agricoles couvrent une superficie totale de près de 2.000 ha; il s'agit de périmètres privés maraîchers et horticoles, et d'un grand périmètre de 1.200 ha réalisé par l'Etat. Malgré l'abondance en eau liée à la présence de sources importantes, d'une nappe phréatique facilement exploitable et d'un cours d'eau pérenne, la plupart des utilisateurs se retrouvent régulièrement en pénurie d'eau à cause d'une augmentation des utilisateurs et des mauvaises efficacités en irrigation. A la demande des parties prenantes publiques et privées actives dans la région, des outils d'aide à la décision ont été développés afin de garantir le suivi-évaluation des ressources en eau et leur exploitation agricole. Il a également été souhaité que les procédures soient réalisables à moindre coût avec les moyens techniques et financiers localement disponibles. Toute une chaîne d'outils d'aide à la décision pour différents niveaux spatiaux a été mise en place : du niveau du bassin versant, à la parcelle en passant par les 1.200 ha du périmètre irrigué. Pour le suivi régional, des cartes d'occupations de sol ont été établies à partir des images satellites et aériennes. Combinées avec des données du réseau hydrométrique, des cartes de consommation en eau régionale ont été dessinées. Des régions présentant de mauvaises efficacités en irrigation ont pu être identifiées et des actions plus détaillées et spécifiques entreprises. Quant au périmètre irrigué, après avoir élaboré un diagnostic des efficacités en irrigation, le logiciel *Scheme Irrigation Management Information System* a été mis en place afin de proposer des scénarii d'irrigation fiables et équitables, et d'améliorer le rendement du périmètre malgré les ressources en eau en diminution. Un partenariat public-privé a été instauré garantissant la durabilité de la gestion hydro-agricole du périmètre. Au niveau de la parcelle, un modèle robuste de productivité de rendement de culture *AquaCrop* a été calibré et validé. Ce logiciel permet aux agents de terrain d'évaluer les efficacités en irrigation ainsi que l'élaboration de calendriers d'irrigation plus productifs et efficaces. Chaque outil est appliqué de manière indépendante à son niveau, nécessitant un nombre limité de données d'entrée; mais les résultats combinés contribuent à une gestion intégrée des ressources en eau pour l'agriculture irriguée.

List d'abréviations & symboles

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement	
A	Distance entre les lignes de vol	m
AEDE	Association Eau Développement et Environnement	
AIOB	Analyse d'image objet basé	
AIPB	Analyse d'image pixel basé	
APEFE	Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger	
ARE	Apport relatif en eau	-
AREC	Apport relatif en eau cumulé	-
AUE	Association d'usagers de l'eau	
B	Longueur de la base	m
CAS	Chinese Academy of Sciences	
CC	Couverture de la canopée	%
CC ₀	Couverture de la canopée du jeune plant à une émergence de 90%	cm ²
CCD	Charged coupled device	
CCx	Couverture maximale de la canopée	%
CDC	Coefficient de déclin de la couverture de la canopée	%
CGC	Coefficient de croissance de la couverture de la canopée	%
CMOS	Complementary metal oxide semiconductors	
Col	Colonnes d'image	
CV	Coefficient de variation	
d	Indice d'ajustement	
DGARE	Direction Générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement	
DGADI	Direction Générale de l'Aménagement et du Développement de l'Irrigation	
DN	Valeur numérique	

ΔT	Intervalle d'exposition	sec
ET	Evapotranspiration de la culture	mm
ET_0	Evapotranspiration de référence	mm
f	Distance focale de la caméra	mm
FAO	Food and Agriculture Organization	
FMI	Fonds Monétaire International	
FSO	Optimisation d'espace des caractéristiques	
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau	
GLCM	Matrice de cooccurrence du niveau de gris	
GPS	Système de localisation mondial	
H_g	Altitude de vol au-dessous du sol	m
ICRISAT	International Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics	
IGB	Institut Géographique du Burkina Faso	
INERA	Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles	
I_r	Apport en eau d'irrigation	mm
IRSA	Institute of Remote Sensing and Digital Earth	
ISIS	Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images SPOT	
KU Leuven	Katholieke Universiteit Leuven	
LAI	Indice foliaire	
LOOCV	Validation croisée non intégrale	
M	Moyenne des variables observées	
MLC	Classification par maximum de vraisemblance	
MNT	Modèle numérique de terrain	
n	Nombre d'observations	
NDVI	Indice de végétation par différence normalisée	
NPK	Azote, phosphore et potassium	
nRMSE	Erreur type normalisée	
OA	Précision globale	

OE	Observatoire de l'Eau des bassins versants du Mouhoun, de la Comoé et du Banifing	
O _i	Valeur observée	
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement	
p	Chevauchement longitudinal	%
P	Infiltration et percolation	mm
P _A	Adéquation	-
P _D	Fiabilité	-
P _E	Equité	-
P _F	Efficacité	-
P _i	Valeur simulée	
PA	Précision du producteur	
PAS	Programme d'Ajustement Structurel	
P _{ef}	Pluviométrie efficace	mm
PIB	Produit intérieur brut	
PPP	Partenariat public-privé	
ppp	Points par pouce	
PTgui	Panorama Tools graphical user interface	
q	Chevauchement latéral	%
Q _D	Eau distribuée	
Q _m	Débit moyen	l/s
Q _R	Eau requise	
R	Sous-région	
R _g	Résolution au sol	m
R ²	Coefficient de détermination	
RAW	Eau du sol facilement disponible	vol%
RVB	Rouge, vert, bleu	
RVV	Rouge, vert, vert	
HIo	Indice de récolte de référence	%
RI	Taux d'utilisation de terres irriguées	-
RMSE	Erreur type	
ROI	Zone d'intérêt	
Row	Lignes d'image	

S	Distance au sol	m
S' _l	Longueur du capteur numérique	mm
S' _h	Hauteur du capteur numérique	mm
SAED	Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du fleuve Sénégal et des Vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé	
SIG	Système d'information géographique	
SIMIS	Scheme Irrigation Management Information System	
SPW	Service Public de Wallonie	
t	Temps	
TAW	Eau totale disponible du sol	vol%
UA	Précision de l'utilisateur	
ULg	Université de Liège	
USAID	U.S. Agency for International Development	
V _g	Vitesse de vol	km/h
VHR	Très haute résolution	
WBI	Wallonie-Bruxelles International	
WP	Productivité de l'eau	gram m ⁻²

Table des matières

Résumé	ii
Liste des symboles	iii
Table des matières	vii
Liste des figures	x
List des tableaux	xii
1. Introduction & résumé	1
2. Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à différents niveaux spatiaux pour la gestion de l'irrigation en Afrique de l'Ouest ...	5
2.1. Introduction	6
2.2. Zone d'étude	7
2.3. Matériels et méthodes	7
2.3.1. Au niveau régional	7
2.3.2. Au niveau du périmètre irrigué	9
2.3.3. Au niveau de la parcelle	10
2.4. Résultats et discussion	11
2.4.1. Résultats régionaux	11
2.4.2. Résultats du périmètre irrigué	13
2.4.3. Résultats sur la parcelle	15
2.5. Conclusions	17
3. Utilisation d'images à haute résolution pour la cartographie détaillée des paysages agricoles complexes : comparaison d'une approche pixel et objet basé	19
3.1. Introduction	20
3.2. Méthodes	23
3.2.1. Acquisition d'images et description du site	23
3.2.2. Classification pixel basé	24
3.2.3. Classification objet basé	27
3.2.4. Evaluation de la précision	28
3.3. Résultats et discussion	29
3.3.1. Analyse pixel basé d'une image	29
3.3.2. Analyse pixel basé de multiples images	30
3.3.3. Analyse objet basé	34

3.4. Conclusions	36
4. Une méthode simple et peu coûteuse pour le prétraitement et l'adaptation des photographies aériennes amateur pour l'évaluation des terres irriguées	38
4.1. Introduction	39
4.2. Zone d'étude	42
4.3. Matériels et méthodes	42
4.3.1. Acquisition d'images	42
4.3.2. Assemblage d'images	44
4.3.3. Géoréférencement d'images et précision spatiale	45
4.4. Résultats et discussion	46
4.4.1. Evaluation de la qualité	46
4.4.2. Evaluation des coûts	48
4.4.3. Evaluation de la précision	49
4.4.4. Possibilités d'application	50
4.5. Conclusions	50
5. Expérience d'un partenariat public-privé dans la gestion d'un périmètre irrigué à l'aide d'outils d'aide à la décision	52
5.1. Introduction	53
5.2. Matériels et méthodes	55
5.2.1. Description de la zone d'étude	55
5.2.2. Indicateurs de performance	56
5.2.3. Outil d'aide à la décision	58
5.2.4. Prise de décision concertée	59
5.2.5. Données	61
5.3. Résultats et discussion	62
5.3.1. Evaluation pré-PPP	62
5.3.2. Activités d'appropriation	66
5.3.3. Evaluation PPP	69
5.4. Conclusions	74
6. Evaluation de la performance du modèle AquaCrop pour la culture du chou sur des petites parcelles irriguées en milieu semi-aride	76
6.1. Introduction	77
6.2. Matériels et méthodes	78

6.2.1.Expériences de parcelle	78
6.2.2.Présentation du modèle	79
6.2.3.Données météorologiques et pédologiques	80
6.2.4.Données de culture	81
6.2.5.Calibration et validation du modèle	84
6.2.6.Evaluation du modèle.....	87
6.3. Résultats et discussions	88
6.3.1.Résultats de calibration et de validation.....	88
6.3.2.Discussion	89
6.4. Conclusion.....	93
7. Conclusion générale & perspectives	94
7.1. Conclusion générale	94
7.2. Perspectives.....	97
Références	100

Liste des figures

Figure 1.1	Aperçu schématique du bassin versant du Kou.....	2
Figure 2.1	Schéma de l'utilisation de l'eau au niveau du bassin versant, présentant les ressources en eau disponibles, la demande et la consommation	12
Figure 2.2	Exemple d'un calendrier de distribution d'eau d'irrigation ..	14
Figure 2.3	Fiche de légende des débits.....	15
Figure 2.4	Echelle hydrométrique et tableau avec la fiche de légende des débits.....	15
Figure 2.5	Teneurs en eau observées et simulées dans une parcelle de choux.....	16
Figure 2.6	Teneurs en eau du sol lorsque le calendrier d'irrigation proposé est suivi.....	16
Figure 2.7	Exemple d'une fiche d'irrigation pour le cas des choux cultivés sur un sol argileux.....	16
Figure 3.1	Image SPOT-5 en composition colorée fausses couleurs de la zone d'étude, classification pixel basé définitive et classification objet basé de l'image SPOT	26
Figure 3.2a	Détail de l'image SPOT-5, détail de la classification pixel basé et détail de la classification objet basé	26
Figure 4.1	Variation des heures journalières d'insolation pendant la saison d'irrigation au Burkina Faso.....	40
Figure 4.2	Comparaison prix vs résolution des mosaïques et des images satellites	40
Figure 4.3	Détail de la mosaïque 2009 affiché par rapport aux contours des mosaïques de 2007 et de 2009.....	46
Figure 4.4	Comparaison d'une image Landsat 7, une photo aérienne commerciale de l'IGB et la mosaïque.....	47
Figure 5.1	Carte pédologique	64
Figure 5.2	Occupation des parcelles en saison d'irrigation 2006.....	64
Figure 5.3	Occupation des parcelles proposée	65
Figure 5.4	Evolution de l'ARE pour les blocs en 2006.....	66
Figure 5.5	Evolution de l'AREC pour les blocs en 2006	66

Figure 5.6	Poster d'évaluation.....	68
Figure 5.7	Occupation des parcelles en saison d'irrigation 2009	70
Figure 5.8	Occupation des parcelles en saison d'irrigation 2010.....	70
Figure 5.9	Evolution de l'ARE pour les blocs en 2009.....	72
Figure 5.10	Evolution de l'AREC pour les blocs en 2009	72
Figure 5.11	Evolution de l'ARE pour les blocs en 2010.....	72
Figure 5.12	Evolution de l'AREC pour les blocs en 2010	72
Figure 6.1	Profils de sol disponibles pour la région et leurs propriétés hydrauliques, avec le profil HC-297 et les caractéristiques utilisées dans la présente étude	81
Figure 6.2a	Exemple d'analyse objet-basé de la fraction de couverture de la canopée avec les commandes eCognition pour le stade phénologique initial.....	82
Figure 6.2b	Exemples d'analyses objet-basé de la fraction de couverture de la canopée avec les commandes eCognition pour le stade phénologique de fin saison.....	83
Figure 6.3	Relation entre la densité des plantes et la couverture maximale de la canopée	85
Figure 6.4	Teneurs en eau du sol observées et simulées	90
Figure 6.5	Couvertures de la canopée observées et simulées utilisant l'ensemble des données (calibration)	90
Figure 6.6	Couvertures de la canopée observées et simulées utilisant des sous-sets pour la LOOCV (validation).....	90
Figure 6.7	Couvertures de la canopée observées et simulées.....	91
Figure 6.8	Biomasses au-dessus du sol observées et simulées utilisant l'ensemble des données (calibration)	91
Figure 6.9	Biomasses au-dessus du sol observées et simulées utilisant des sous-sets pour la LOOCV (validation).....	91

Liste des tableaux

Tableau 3.1	Précision globale, précision du producteur, précision de l'utilisateur et coefficient Kappa pour la classification pixel basé pour 5 classes utilisant 13 bandes	32
Tableau 3.2	Précision globale, précision du producteur, précision de l'utilisateur et coefficient Kappa pour la classification pixel basé pour 7 classes utilisant 13 bandes	32
Tableau 3.3	Précision globale, précision du producteur, précision de l'utilisateur et coefficient Kappa pour la classification pixel basé après analyse de détection du changement	33
Tableau 3.4	Précision globale, précision du producteur, précision de l'utilisateur et coefficient Kappa pour la classification objet basé pour 5 classes	33
Tableau 3.5	Caractéristiques dans l'approche optimisée par le plus proche voisin et fonctions d'appartenance	35
Tableau 4.1	Calculs des plans de vol pour les levés de 2007 et 2009 ...	44
Tableau 4.2	Evaluation des coûts de production des mosaïques, en heures et en dollars	49
Tableau 4.3	Liste de prix minimum d'images satellites	49
Tableau 5.1	Résumé des indicateurs de performance ; avec des mesures de débit des canaux tertiaires comme base pour les indicateurs au niveau des blocs et des mesures de débit des canaux secondaires pour l'analyse au niveau du périmètre, et la légende d'interprétation	65
Tableau 5.2	Résumé des résultats de l'enquête	73
Tableau 5.3	Remarques groupées des agriculteurs sur le PPP	73
Tableau 6.1	Liste des champs utilisés pour la calibration et la validation d'AquaCrop pour le cas de choux	81
Tableau 6.2	Paramètres de culture adaptés utilisés dans AquaCrop pour la simulation de la productivité des choux	86
Tableau 6.3	Rendements observés, simulés et potentiels de choux, avec les écarts, les ratios et quelques variables d'entrée	92

1 Introduction & résumé

La présente étude s'inscrit dans le cadre du projet intitulé « Renforcement structurel des capacités de gestion des ressources en eau pour l'agriculture irriguée (Burkina Faso)' » financé par « l'Association pour la Promotion de l'Éducation et de la Formation à l'Étranger » (APEFE) et « Wallonie-Bruxelles International » (WBI). Initié depuis 2005 dans le bassin versant du Kou, situé dans le sud-ouest du Burkina Faso, le projet vise à appuyer les acteurs locaux dans le suivi et la gestion de l'agriculture irriguée en fournissant des données objectives et des outils de gestion appropriés afin de les guider dans leur prises de décisions et la résolution des conflits.

Le bassin versant du Kou est relativement riche en ressources en eau : plusieurs sources, une rivière pérenne et une nappe phréatique peu profonde facilement exploitable. Ces ressources font cependant l'objet d'une surexploitation par un nombre sans cesse croissant d'utilisateurs d'eau. Ce petit bassin (1.800 km²) contient la deuxième plus grande ville du Burkina Faso (Bobo-Dioulasso). Il couvre un ancien périmètre de riz irrigué aménagé par l'Etat et plusieurs zones agricoles informelles en pleine expansion (Figure 1.1). Cette ceinture agricole constitue la source d'approvisionnement en produits alimentaires de la ville de Bobo-Dioulasso et même des régions plus éloignées, et représente un acteur économique majeur. Malgré l'abondance des ressources en eau, la plupart des utilisateurs de l'eau sont régulièrement confrontés à des pénuries d'eau dues à une intensification non contrôlée des terres irriguées et de faibles efficiences en irrigation. Tout cela se traduit par des relations tendues entre les usagers de l'eau du bassin versant ; en particulier entre les zones agricoles informelles en amont et le périmètre irrigué en aval.

Les décideurs et acteurs locaux avaient donc besoin d'outils d'aide à la décision, faciles à utiliser et peu coûteux pour le suivi et l'exploitation des ressources en eau à différents niveaux spatiaux et pour différents utilisateurs :

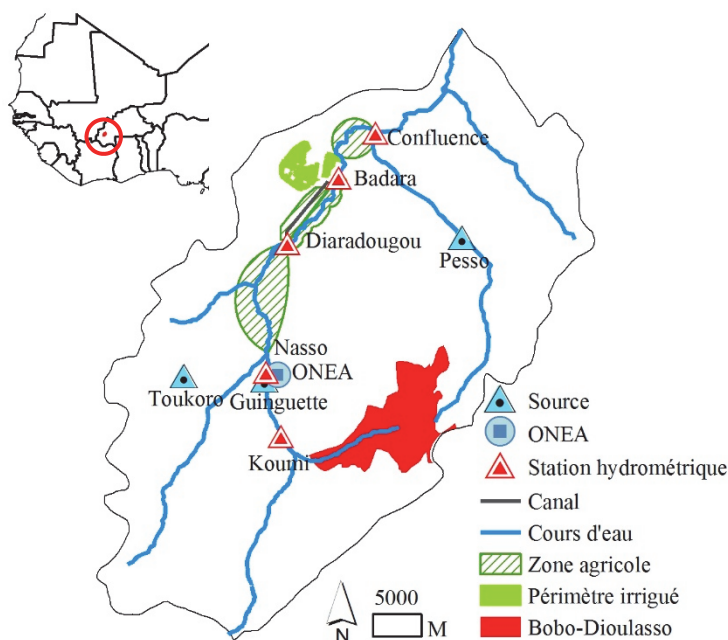


Figure 1.1 – Aperçu schématique du bassin versant du Kou.

- Au niveau supérieur, niveau du bassin versant, des outils étaient nécessaires pour le suivi de l'expansion des zones agricoles et l'utilisation régionale de l'eau. Des stations hydrométriques ont été installées et des techniques de télédétection ont été mises au point pour cartographier les terres agricoles.
- À un niveau intermédiaire, un outil a été adapté pour élaborer une répartition plus équitable de l'eau sur les 1.200 ha du périmètre rizicole irrigué. Un partenariat public-privé a été mis en place afin de garantir son appropriation et le partage des décisions entre les propriétaires de parcelle impliqués.
- Au niveau inférieur, niveau de la parcelle, un modèle simple de bilan hydrique eau-sol-plante a été calibré et validé pour l'optimisation des calendriers d'irrigation et l'estimation des rendements par les agents de vulgarisation.

Chaque outil est appliqué indépendamment utilisant un nombre limité de données ; mais leurs résultats combinés ont contribué à une meilleure gestion intégrée de l'eau.

La conception et l'intégration de ces différents outils d'aide à la décision sont détaillées tout au long de la présente étude. Les différents chapitres (2-6) sont basés sur des articles scientifiques publiés ou soumis dans des revues à comité de lecture et sont ainsi structurés : introduction, matériels et méthodes, résultats, discussion, conclusions. En conséquence, certaines parties sont répétitives, mais chaque chapitre peut être lu comme une étude à part. Le Chapitre 7 présente une conclusion de synthèse.

Le Chapitre 2 décrit le cadre d'utilisation des outils d'aide à la décision conçus pour différents niveaux géographiques et d'utilisateurs. D'une manière générale, les différents outils et leurs interactions y sont exposés. Chaque outil et sa conception sont traités plus en détail dans les chapitres suivants.

Le Chapitre 3 porte sur une comparaison de la classification pixel et objet basé des images de haute résolution pour la cartographie détaillée du complexe paysager agricole informel, propre à la région. En utilisant un logiciel spécialisé, l'approche objet basé a été plus performante que l'approche pixel basé. Néanmoins, en appliquant des filtres appropriés dans la pré-analyse de l'image, une classification pixel basé, facile à utiliser, donnait des résultats satisfaisants.

Le Chapitre 4 met en exergue les problèmes liés aux conditions atmosphériques (nuages, poussière) qui empêchent souvent l'acquisition des images satellites en temps opportun. Il décrit une méthode simple et peu coûteuse pour le prétraitement et le mosaïquage des photographies aériennes amateur pour évaluer l'utilisation des terres agricoles. Cette approche est moins sensible aux conditions atmosphériques qui sont imprévisibles dans la programmation d'images satellites.

Le Chapitre 5 met l'accent sur la façon dont la mauvaise gestion des 1.200 ha du périmètre irrigué rizicole a été améliorée par la création d'un partenariat public-privé. Après une évaluation des efficacités du périmètre, une répartition plus équitable de l'eau a été élaborée à l'aide de SIMIS (*Scheme Irrigation Management Information System*).

Le Chapitre 6 fournit des détails sur l'échelle la plus fine de gestion de l'eau d'irrigation : les parcelles individuelles. On a, au préalable, noté que les rendements et les calendriers d'irrigation n'ont jamais été optimaux. Un modèle de simulation de croissance de culture simple et rigoureux, AquaCrop,

a été adapté pour le cas du chou afin d'évaluer l'utilisation de l'eau d'irrigation et son impact sur le rendement.

L'autonomie et le développement durable restaient de tout temps les objectifs visés en tenant compte des ressources techniques et financières (limitées) disponibles au niveau local. Les données nécessaires ont été également réduites au minimum. Malgré ces contraintes, il y a lieu de souligner la bonne performance des différents outils, car répondant aux besoins exprimés par les intervenants.

2 Un cadre pour l'utilisation des outils d'aide à la décision à différents niveaux spatiaux pour la gestion de l'irrigation en Afrique de l'Ouest¹

Le bassin versant du Kou dans le sud-ouest du Burkina Faso souffre d'une gestion médiocre de l'eau depuis plusieurs décennies. S'étendant sur 1.800 km², ce petit bassin contient la deuxième plus grande ville du Burkina Faso (Bobo-Dioulasso). Il couvre un ancien périmètre de riz irrigué aménagé par l'état et plusieurs zones agricoles exploitées de façon informelle. Malgré l'abondance des ressources en eau, la plupart des utilisateurs de l'eau font régulièrement face à des pénuries d'eau en raison d'une augmentation de la population et de pratiques d'irrigation inefficaces. Les acteurs locaux ont donc besoin d'outils d'aide à la décision peu coûteux, et faciles à utiliser pour leur permettre de contrôler et d'exploiter au mieux les ressources en eau aux différents niveaux spatiaux et d'utilisateur.

Une série d'outils de gestion de l'eau conçus selon une approche descendante, en termes d'échelle spatiale, a été mise en place pour résoudre les problèmes actuels : au niveau du bassin versant (niveau supérieur) jusqu'au niveau de la parcelle (niveau inférieur), en passant par les 1.200 ha du périmètre irrigué rizicole. Des techniques de télédétection ont été conçues pour établir une cartographie des terres agricoles. Ces techniques combinées avec les données de débit fournies par un réseau de stations hydrométriques, ont permis de compiler des cartes régionales de l'utilisation de l'eau. Le logiciel SIMIS est utilisé pour la gestion publique-privée du périmètre irrigué. Un modèle simple de bilan hydrique de culture, AquaCrop, est utilisé par les agents de vulgarisation pour rédiger des calendriers d'irrigation. L'utilisation quotidienne de l'eau dans des parcelles irriguées a été suivie grâce aux

¹ Adapté de: Wellens, J., Traoré, F., Diallo, M., Tychon, B., 2013. A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the management of irrigated agriculture in West-Africa. *Agricultural Sciences*, 4 (8A), 9-15.

prélèvements des taux d'humidité du sol et aux mesures de densité du couvert végétal. Chaque outil de gestion de l'eau est appliqué indépendamment, n'exigeant que peu de données, mais leurs résultats combinés contribuent à une gestion intégrée améliorée de l'eau.

2.1 Introduction

On prévoit pour 2030, un accroissement des terres irriguées de 28 % (FAO, 2002). En Afrique subsaharienne semi-aride, la croissance rapide de la population et des sécheresses récurrentes ont conduit aux appels réitérés pour le développement de l'irrigation (Urama, 2005). Au Burkina Faso, le gouvernement a initié plusieurs programmes d'eau et d'agriculture. Les ressources en eau sont maintenant gérées au niveau des bassins versants. Les grands périmètres irrigués aménagés par l'Etat sont poussés à améliorer leurs efficacités et productivités agricoles, et dans des zones disposant de ressources en eau, des initiatives d'irrigation au profit des petits agriculteurs sont encouragées. Dans ce contexte, la gestion de l'eau devient inévitablement complexe car elle implique différentes échelles spatiales, plusieurs intervenants et divers objectifs. Des études existent en matière de gestion de l'eau par plusieurs utilisateurs et à plusieurs niveaux à l'aide de modèles de simulation intégrés (Victoria et al., 2005 ; Bergez et al., 2012), mais l'utilisation de ces modèles requiert souvent des opérateurs hautement qualifiés et d'énormes quantités de données, pas encore disponibles dans le pays.

Les acteurs locaux au Burkina Faso ont besoin d'outils d'aide à la décision peu coûteux, et faciles à utiliser pour leur permettre de contrôler et d'exploiter au mieux les ressources en eau aux différents niveaux spatiaux et d'utilisateur. Ces outils sont nécessaires pour : (i) les agences de gestion de bassin versant, (ii) les associations d'utilisateurs de l'eau (AUE) au niveau du périmètre irrigué, et (iii) les services de vulgarisation présents sur le terrain. Ce chapitre décrit les outils d'aide à la décision qui ont été conçus et adaptés pour permettre de résoudre les problèmes de gestion de l'eau à différentes échelles ou niveaux, et met en relief comment leurs résultats combinés permettent une approche de gestion intégrée améliorée de l'eau.

2.2 Zone d'étude

Le bassin versant du Kou dans le sud-ouest du Burkina Faso est relativement riche en ressources en eau, avec plusieurs sources d'eau et un cours d'eau pérenne. Malheureusement, ces ressources sont surexploitées par des demandes d'irrigation en croissance rapide causées par une augmentation de la population et de faibles efficacités des pratiques d'irrigation.

La Figure 1.1 présente les utilisateurs de l'eau d'irrigation. Dans les zones en amont, les rives et les plaines sont occupées pour l'agriculture irriguée informelle. L'eau est directement détournée, siphonnée ou pompée pour l'irrigation par bassin ou à la raie vers une vaste mosaïque de petites parcelles. Il n'y a aucun règlement en matière de gestion de l'eau dans ces zones, et les utilisateurs plus en amont sont donc les premiers et les mieux servis. Plus en aval, s'étend le périmètre irrigué de 1.200 ha, appelé Vallée du Kou, créé en 1973. Après 1993, les programmes d'ajustement structurel (PAS) ont amené le transfert de la gestion du périmètre par des fonctionnaires de l'Etat à une nouvelle et inexpérimentée AUE. Les travaux d'entretien ont diminué, les rendements commencèrent à chuter et une augmentation de la consommation d'eau en amont rendait plus difficile la satisfaction des besoins en eau, avec pour conséquence l'abandon d'un quart des parcelles.

2.3 Matériels et méthodes

2.3.1 Au niveau régional

Pour le monitoring de l'irrigation au niveau régional, les ressources en eau disponibles et l'usage agricole de l'eau devaient être observés et analysés. Les ressources en eau disponibles avaient depuis longtemps été suivies par un réseau national de stations hydrométriques (Figure 1.1). En ce qui concerne l'usage agricole de l'eau, il était nécessaire de dresser une carte des superficies irriguées.

Plusieurs études cartographiques ont été menées à l'aide de la télédétection, mais peu ont mis l'accent sur le paysage subsaharien très complexe. L'agriculture irriguée en Afrique subsaharienne est caractérisée par

de petites parcelles très fragmentées, ayant une superficie moyenne de 0,5 ha et rarement supérieure à 1 ha. La présence discontinue d'arbres et d'arbustes dans des milieux de type savane contribue également à cet aspect hétérogène du paysage (Hulley et Setterfield, 2008). Dans ce contexte, des images à haute résolution (SPOT, Quickbird, Ikonos) sont les plus appropriées, car la taille des champs est au moins 3 - 4 fois supérieure à la taille des pixels de l'image satellite (Lillesand et al., 2004). Lorsqu'il s'agit cependant de paysages complexes, ce plus grand niveau de détail crée des caractéristiques complexes dans le domaine spectral. Beaucoup de petits objets sont concentrés dans une petite zone, et deviennent de plus en plus visibles lorsque la résolution spatiale devient plus fine. Cette situation peut éventuellement mener à une plus faible précision de la classification (Myint et al., 2011).

Afin de réduire le problème de l'hétérogénéité dans l'approche pixel basé, des filtres de texture peuvent être utilisés dans la pré-analyse de l'image. Les matrices de cooccurrence du niveau de gris (GLCM, *Grey Level Cooccurrence Matrix*) ont été calculées. Un GLCM est une matrice des fréquences relatives où des valeurs de pixels identiques apparaissent dans deux fenêtres mobiles voisines. Il indique le nombre d'occurrences de la relation entre un pixel (ex. représentant un arbre) et ses voisins (ex. représentant un champ ou la savane). Le filtre adoucit l'image et transforme l'hétérogénéité de l'image en un atout pour une meilleure précision de la classification.

L'analyse d'image objet basé (AIOB) est une alternative pour surmonter ces difficultés d'hétérogénéité en segmentant tout d'abord une image en clusters de groupes de pixels voisins similaires (objets) et en classant ensuite ces clusters selon des propriétés spectrales (ou autres) moyennes. Cela réduit les variations spectrales au sein des objets et permet aux autres relations contextuelles et topologiques (ex. à proximité de, entouré de, à côté de) d'être utilisées dans la classification (Cleve et al., 2008).

Lorsque plusieurs images de la zone d'étude prises à des moments différents sont disponibles, il est possible d'utiliser les informations fournies à chaque date pour améliorer la classification des autres images à l'aide d'analyses multi-temporelles. L'analyse multi-temporelle d'images classifiées offre une grande possibilité pour l'identification des zones irriguées (Ozdogan et Gutman, 2008 ; Heller et al., 2012).

La détection du changement est le processus d'identification des différences dans l'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à des moments différents. La technique d'analyse de détection du changement utilisée dans le cadre de cette étude s'est focalisée sur une comparaison post-classification. Cette technique génère une matrice des trajectoires d'occupations pour une série d'images classifiées. Les comparaisons post-classification permettent d'étudier des anomalies dans une trajectoire d'occupations pour une série d'images (Zhou et al., 2008).

Wentz et al. (2006) ont conclu que pour cartographier des terroirs complexes, des photographies aériennes sont nécessaires. Pour le monitoring de la végétation sur de grandes superficies, des photographies aériennes peuvent être mosaïquées (Baker et al., 1995). Cette approche est moins sensible aux conditions atmosphériques qui ne sont pas prévisibles lors de la programmation d'images satellites.

Toutes ces différentes approches de traitements d'images satellites et aériennes ont été étudiées sur leur pertinence à cartographier des terres agricoles complexes.

2.3.2 Au niveau du périmètre irrigué

Pour résoudre les problèmes de gestion de l'AUE de la vallée du Kou, un partenariat public-privé (PPP), basé sur le modèle « d'externalisation par le biais de contrats de service ou de gestion » (Banque Mondiale, 2007), a été mis en place. Les agents de l'Etat, un opérateur privé spécialisé dans la gestion de l'eau et l'équipe du projet ont mis à contribution leurs efforts. Des études techniques ont été effectuées afin d'évaluer les problèmes d'eau, y compris : la cartographie du périmètre et la création d'une base de données, le suivi des occupations et l'évaluation de la distribution d'eau à l'aide d'un ensemble d'indicateurs de performance (Molden et Gates, 1990).

Les analyses des indicateurs de performance et d'occupation des parcelles ont clairement démontré la nécessité d'un outil d'aide à la décision afin de parvenir à une répartition plus équitable de l'eau (Wellens et al., 2013b). Lozano et Mateos (2008) ont montré que, parmi une liste d'outils d'aide à la décision, SIMIS serait particulièrement utile pour la gestion des périmètres

irrigués, en particulier lorsque des tours d'eau fixes sont utilisés pour réaliser une distribution équitable en périodes de pointe. SIMIS est l'outil d'aide à décision en matière de gestion des périmètres irrigués, conçu par la FAO (Sagardoy et al., 2001 ; Mateos et al., 2002).

Tout au long de la présente étude, des séances de sensibilisation et de travail participatif ont été organisées. Compte tenu des caractéristiques variées des sols (sols sablonneux perméables ou argileux) et les deux principales cultures sur le périmètre, à savoir le riz paddy et le maïs, différents scénarios de gestion ont été présentés. A tout moment, les agriculteurs étaient encouragés à exprimer leurs points de vue et les divers scénarios ont été adaptés en conséquence. L'AUE a finalement approuvé un scénario basé sur l'irrigation déficitaire (Geerts et Raes, 2009) : l'utilisation des terres a été optimisée en prenant en compte les différents types de sols (maïs sur des sols sableux et le riz sur des sols argileux), avec du riz paddy en irrigation déficitaire.

À la fin de chaque saison gérée conjointement, une évaluation a été réalisée. Les occupations de parcelle proposées par rapport aux occupations réelles, et les débits proposés par rapport aux débits observés à la tête des différents canaux secondaires ont été présentés à l'AUE. Les agriculteurs ont évoqué les difficultés rencontrées et des recommandations ont été faites pour la prochaine campagne irriguée.

2.3.3 Au niveau de la parcelle

La FAO a conçu AquaCrop, un modèle de simulation de productivité eau-sol-plante pour servir d'outil d'aide à la décision dans la planification et l'analyse (Steduto et al., 2009 ; Hsiao et al., 2009). Il utilise un nombre relativement réduit de paramètres qui peuvent être ajustés selon les cas et les cultures. Souvent, des paramètres intuitifs d'entrée par défaut qui peuvent être déterminés à l'aide de méthodes simples (Raes et al., 2009) sont suffisants.

L'élaboration des calendriers d'irrigation efficaces uniquement basés sur des études de terrain est longue et difficile. Des modèles de productivité de l'eau à usage agricole, tel que AquaCrop, offrent une solution pratique (Geerts

et al., 2010). Une fois calibré et validé, des calendriers d'irrigation adaptés peuvent être établis.

AquaCrop a été évalué dans plusieurs champs de choux de la région (Wellens et al., 2013c). Peu de données de terrain étaient nécessaires. Les données météorologiques et pédologiques ont été fournies par des organismes sous tutelle de l'Etat. Les calendriers d'irrigation ont été collectés. La teneur en eau du sol a été suivie par la méthode gravimétrique chaque semaine à des intervalles de 0,2 m jusqu'à une profondeur de 0,6 m. Ces mesures ont été répétées trois fois à chaque passage, permettant l'évaluation de la simulation du bilan hydrique du sol. Toutes les données de culture nécessaires ont été acquises pour chaque champ en prenant chaque semaine des dizaines de photos perpendiculaires (2 m au-dessus du couvert végétal) (Hu et al., 2007).

Des calendriers d'irrigation ont été établis pour donner aux agriculteurs des lignes directrices simples sur la façon d'adapter leur irrigation pendant la campagne agricole. Dans la conception de ces calendriers, la profondeur de l'irrigation a été généralement considérée comme fixe. Des profondeurs fixes combinées avec des intervalles variables d'irrigation conduisent à une utilisation efficiente de l'eau d'irrigation (Raes et al., 2000). Par souci de simplicité et afin d'encourager leur adoption par les agriculteurs, le nombre de calendriers d'irrigation a été réduit au minimum ; ce qui signifie qu'on a dû procéder à une certaine généralisation. Pour chaque culture, les calendriers devraient être basés sur deux dates de semis, les sols majeurs et deux différentes valeurs initiales de la teneur en eau du sol au début de la saison d'irrigation (Hill et Allen, 1996).

2.4 Résultats et discussion

2.4.1 Résultats régionaux

Des images SPOT-5, prises le 22 janvier 2011 et le 4 avril 2011, ont été utilisées. L'occupation du sol a été divisée en cinq grandes classes : terres irriguées, forêts, savanes, sols nus et eau. La diversité des cultures et l'exiguïté des parcelles ne permettaient pas de définir des sous-classes plus détaillées, mais cela était bien suffisant pour l'étude. Grâce au post-traitement, la

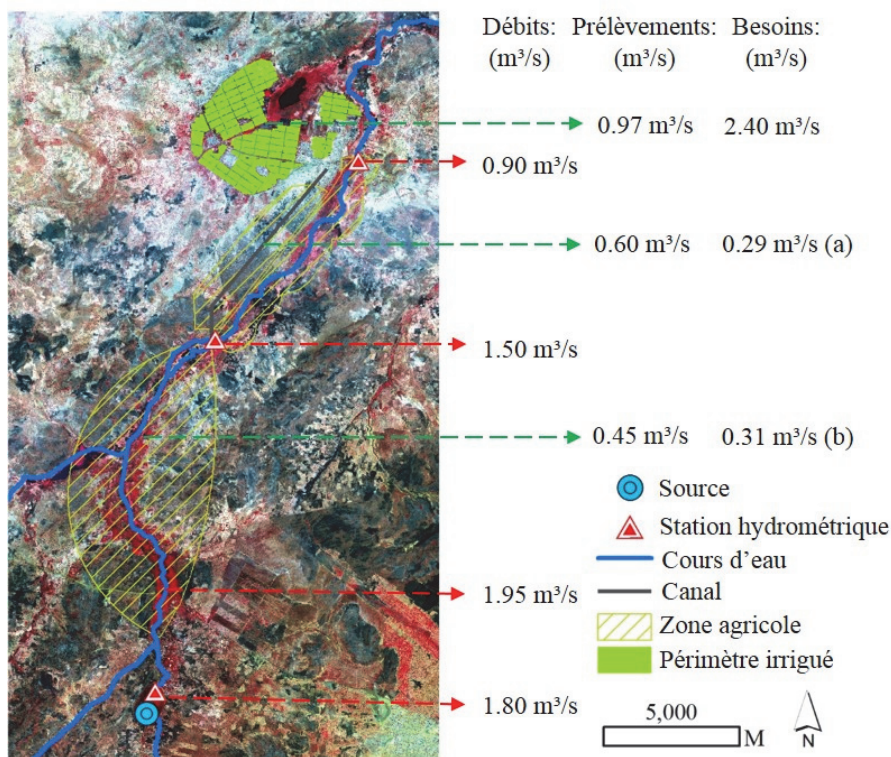


Figure 2.1 – Schéma de l'utilisation de l'eau au niveau du bassin versant, présentant les ressources en eau disponibles, la demande et la consommation. (a) 286 ha ; (b) 643 ha, 53 % irriguées à partir de la rivière. (IIMI, 1997 ; Wellens et al., 2007 ; Traoré et al., 2013, chapitre 3)

précision de la classification est passée de 86,45 à 89.34 %, surtout pour les zones irriguées qui ont été mieux cartographiées (chapitre 3).

L'étude a montré une saturation prochaine des terres occupées par l'agriculture irriguée. Plusieurs autres études ont confirmé que les zones irriguées avaient augmenté de près de 70 % en 20 ans, en particulier au cours de la dernière décennie (Traoré et al., 2013). Tel que rapporté par Ouédraogo (2010), une grande partie des pâturages et de la savane a été transformée en terres agricoles irriguées suite à un afflux de migrants en provenance de zones aux faibles ressources en eau. L'augmentation des superficies emblavées s'explique aussi par la baisse des coûts de matériel agricole (pompes) et de la popularité de certaines cultures à haut rendement, comme la banane.

La figure 2.1 établit un lien entre les ressources en eau disponibles, une estimation de l'eau utilisée (différence entre les deux stations hydrométriques)

et une estimation des besoins en eau (Traoré, 2012). La quantité standard brute en eau requise a été estimée à 1 l/s/ha (IIMI, 1997). Il demeure évident qu'en règle générale l'irrigation en amont était très inefficace, avec dans certaines régions une consommation d'eau deux fois supérieure aux besoins en eau. En conséquence, le périmètre irrigué en aval enregistre des pénuries d'eau chroniques. Des stations hydrométriques supplémentaires seront installées pour garantir la couverture complète de la zone.

7.1.2 Résultats du périmètre irrigué

Des calendriers détaillés d'irrigation ont été établis à l'aide du logiciel SIMIS et un programme de distribution d'eau de la prise à la parcelle a été proposé (Figure 2.2). Un facteur important était l'installation de « légendes de débits » (Figure 2.3) à côté de l'échelle hydrométrique à la tête de chaque canal secondaire (Figure 2.4), donnant aux agriculteurs une idée de l'eau consommée par les différents canaux secondaires et stimulant ainsi un contrôle basé sur la pression des pairs (Aggarwal, 2000).

Une évaluation du PPP a été conduite. Les occupations des parcelles ont été suivies. Les débits en tête de chaque canal secondaire ont été surveillés tous les jours et une enquête a été réalisée pour évaluer la satisfaction des agriculteurs par rapport au PPP. Des améliorations ont été notées, mais aucune ne présente une différence significative par rapport à la situation *ex ante* (Wellens et al., 2013). Plus d'agriculteurs ont maintenant accès à l'eau, mais tous leurs besoins ne sont pas satisfaits. En général, un consensus est né sur un calendrier de distribution d'eau plus équitable, mais beaucoup de travail reste à faire. Dans l'ensemble, dans une région où l'eau devient plus rare, une continuation du déclin de la gestion de l'eau a été évitée.

Une proportion importante de la population active du périmètre (198 sur 1.291 propriétaires de parcelle) a été ciblée lors d'une enquête afin d'évaluer leur satisfaction. La réponse globale était très positive (90 % satisfaits) et la plupart était disposée à continuer à s'impliquer dans ce projet de gestion basée sur le PPP. Près de 25 % ont souligné une amélioration de leurs moyens de subsistance en raison d'une meilleure distribution de l'eau, mais l'ampleur de cette amélioration n'a pas été précisée.



Figure 2.2 – Exemple d'un calendrier de distribution d'eau d'irrigation. Sur les canaux : débits (l/s) et heure d'ouverture et de fermeture des vannes. Sur les parcelles : horaires d'ouverture et fermeture des vannes. Le calendrier est repris tous les 4 jours : les J1 et J3 sont les jours 1 et 3, il n'y a pas d'irrigation aux jours 2 et 4.

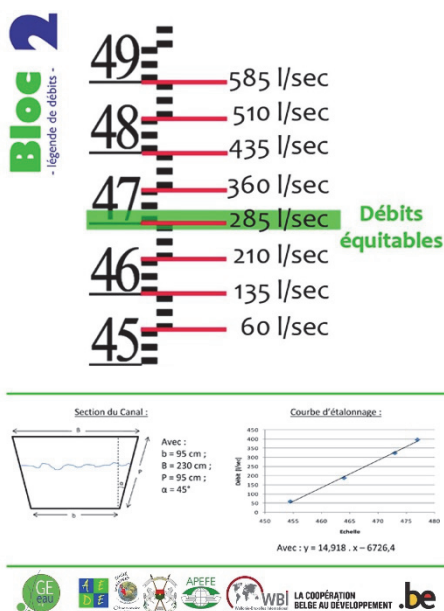


Figure 2.3 – Fiche de légende des débits, avec le débit équitale proposé en vert.

Figure 2.4 – Echelle hydrométrique et tableau avec la fiche de légende des débits.

7.1.3 Résultats sur la parcelle

La Figure 2.5 donne un exemple des teneurs en eau du sol observées et simulées dans une parcelle de choux. Le suivi a commencé 3 semaines après la plantation. La teneur en eau du sol a dépassé la capacité au champ durant la majeure partie de la saison de croissance, entraînant des pertes d'eau par percolation.

Les données météorologiques, pédologiques et culturales susmentionnées ont été utilisées afin d'optimiser le calendrier d'irrigation à l'aide d'AquaCrop. Après une irrigation initiale pour préparer le champ en vue du repiquage, la teneur en eau initiale était supposée correspondre à la capacité au champ. Une dose d'irrigation de 35 mm est commune dans la zone si appliquée dans des bassins à l'aide d'une motopompe. Les teneurs en eau du sol résultantes sont données dans la Figure 2.6. La teneur en eau du sol est restée bien au-dessous de la capacité au champ et au-dessus de la réserve facilement utilisable (RAW, *Readily Available Water*). Avec l'aide des agents de vulgarisation, le tableau d'irrigation présenté dans la Figure 2.7 peut être utilisé par les agriculteurs.

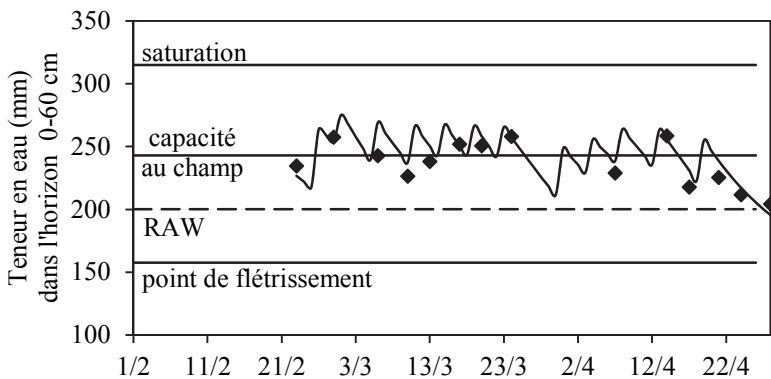


Figure 2.5 – Teneurs en eau observées (points) et simulées (ligne) dans une parcelle de chou. Chaque point représente une moyenne de trois données.

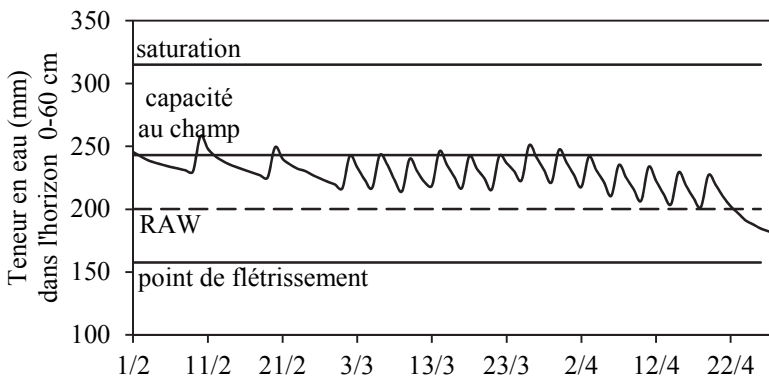


Figure 2.6 – Teneurs en eau du sol lorsque le calendrier d'irrigation proposé est suivi.

Consignes d'irrigation:

Choux:

Type de sol: argileux

Dose brute d'irrigation: 35 mm

mois	Février			Mars			Avril		
décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3
intervalle	10 jours			4 jours					
stade	transplantation						récolte		
	initiale			développement			mi	fin	

■: irrigation initiale pour la préparation du terrain

0.6 efficacité d'application à la parcelle (Bos and Nugteren, 1990)

Figure 2.7 – Exemple d'une fiche d'irrigation pour le cas des choux cultivés dans la région de Bobo-Dioulasso sur un sol argileux.

2.5 Conclusions

La gestion de l'eau à usage agricole peut rapidement devenir complexe lorsqu'une intervention est nécessaire à différents niveaux spatiaux et d'utilisateur, en particulier lorsqu'il existe des interactions entre ces différents niveaux. Les parties prenantes dans la gestion des ressources en eau d'un bassin versant au Burkina Faso font face à cette perspective. Au niveau régional, l'organisme en charge de la gestion d'un bassin versant avait besoin d'un outil pour le suivi de l'utilisation de l'eau dans toute la région du bassin versant, et les guider dans la répartition de l'eau et dans l'arbitrage lors des conflits. Face à des pénuries d'eau chroniques, l'AUE a recherché un moyen de parvenir à une répartition plus équitable de l'eau au niveau du principal périmètre irrigué du bassin versant. Sur les parcelles, les agents de vulgarisation avaient besoin d'aide par rapport aux conseils à donner aux petits exploitants informels et indépendants installés à travers la région. Tous ces services opèrent dans le même bassin versant en utilisant les mêmes ressources en eau, mais à différents niveaux d'interactions.

Au niveau des bassins versants, des images satellites et aériennes ont été analysées pour cartographier l'aménagement complexe du terroir. Combinées avec des données d'un réseau hydrométrique, cela a permis d'évaluer les efficacités de l'utilisation de l'eau dans les différentes régions. Le résultat était une carte objective confirmant les pratiques d'irrigation inefficaces des utilisateurs informels installés en amont et l'effet dévastateur qui en découle sur le périmètre irrigué formel en aval. Sur la base de ces résultats, les intervenants ont conclu qu'il faudrait également des interventions aux deux niveaux inférieurs : au niveau du périmètre irrigué et au niveau de la parcelle.

Au niveau du périmètre irrigué, l'AUE devait accepter que les ressources en eau soient en baisse. Avec l'installation d'un PPP, la gestion de l'eau a pris un nouvel élan. Des calendriers d'irrigation plus équitables, mais déficitaires, ont été conçus à l'aide du logiciel SIMIS. Tout au long du processus, tous les utilisateurs ont été consultés et ont contribué activement à l'amélioration de ces calendriers. Après 3 ans, aucun changement significatif n'était apparent, mais un nouveau déclin dans la gestion de l'eau avait été évité. Les agriculteurs semblent être satisfaits de l'approche et ses résultats, et sont

déterminés à voir continuer le PPP. Grâce à des indicateurs objectifs et plusieurs séances d'échange d'informations, les agriculteurs ont pris conscience des problèmes de gestion du périmètre irrigué et ne tiennent plus seulement pour responsables les utilisateurs en amont.

Plus difficiles à conseiller sont les milliers de petits exploitants éparpillées en amont du bassin versant. L'approche régionale a mis en évidence leurs pratiques d'irrigation inefficaces. A ce niveau, il n'existe aucune AUE ; tous les agriculteurs travaillent de manière indépendante. Une surveillance individuelle de ces champs est impossible. Les cartes d'irrigation simples et indicatives établies en utilisant AquaCrop seront transférées par les agents de vulgarisation afin d'augmenter les efficacités en irrigation et ainsi accroître la disponibilité en eau pour les utilisateurs en aval. Des fiches d'irrigation pour les autres cultures restent à élaborer.

Dans un paysage agricole complexe et hétérogène, où les compétences et données sont limitées, des outils de gestion des ressources en eau adaptés et faciles à utiliser ont été introduits pour les différents utilisateurs et les différentes échelles. Chaque outil est appliqué de manière indépendante, mais les résultats combinés contribuent à une gestion intégrée améliorée de l'eau.

3 Utilisation d'images à haute résolution pour la cartographie détaillée des paysages complexes: comparaison d'une approche pixel et objet basé²

Comme dans de nombreuses régions d'Afrique de l'Ouest, l'agriculture irriguée gagne du terrain au Burkina Faso, entraînant une pression accrue sur les terres. Par conséquent, il est important, que les acteurs locaux disposent d'outils de télédétection faciles à utiliser pour la classification des images à haute résolution pour la cartographie des zones agricoles complexes et hétérogènes, propres à la région. Des approches de classification pixel et objet basé ont été comparées. La classification pixel basé par maximum de vraisemblance (MLC) a été préférée pour sa simplicité et son utilisation courante. Les bandes originales SPOT-5 ont été enrichies avec neuf matrices de co-occurrence du niveau de gris (GLCM) (variance, contraste et l'entropie pour toutes les trois bandes) afin d'intégrer les informations de l'hétérogénéité dans la classification. Avec la disponibilité de plusieurs images, des comparaisons post-classification ont permis de définir un ensemble de règles relatives à la détection des changements afin de corriger toute anomalie dans les classifications entre les images. Pour cinq grands types d'occupation du sol, la précision globale (OA) de l'approche pixel basé était 89,34% et le coefficient Kappa 0,84. Les GLCM ont fait de l'hétérogénéité des images un atout pour réaliser une classification plus précise. L'approche objet basé est plus performante que le pixel basé en termes de précision (OA 96,13%, coefficient Kappa 0,94) et a permis de mieux classifier les zones irriguées. Cette approche, cependant, était fastidieuse et exigeait le recours aux logiciels très spécialisés. Avec l'utilisation de filtres appropriés au cours de la pré-analyse de l'image et quelques traitements post-classification, la classification pixel basé, plus facile à utiliser, produisait des résultats satisfaisants. Elle a été

² A soumettre: Wellens, J., Denis, A., Traore, F., Tychon, B.. Using high-resolution imagery for the detailed mapping of complex West African agricultural landscapes: a comparison between pixel- and object-based classification approaches.

adoptée au Burkina Faso car elle prend en compte les ressources techniques localement disponibles, garantissant ainsi l'autonomie et la durabilité.

3.1. Introduction

Au cours de ces dernières décennies, le bassin versant du Kou dans le sud-ouest du Burkina Faso se caractérise par une gestion médiocre de l'eau. Malgré l'abondance de l'eau, grâce à un cours d'eau pérenne et une nappe phréatique peu profonde, facilement exploitable, la plupart des utilisateurs de l'eau font régulièrement face à des pénuries d'eau en raison de l'augmentation des surfaces irriguées. L'agriculture subsaharienne se caractérise par une mosaïque de petites exploitations, généralement avec des arbres et des arbustes qui bordent les champs, souvent poussant dans les champs mêmes. Les acteurs locaux ont besoin d'une procédure simple à utiliser pour la cartographie détaillée de leurs zones agricoles complexes et très hétérogènes, en utilisant l'imagerie à haute résolution.

Castillo-González et al. (2009) cite plusieurs études d'inventaire de la végétation en utilisant des images à haute résolution, principalement dans les pays développés où les grandes parcelles agricoles homogènes sont la norme. Il y a très peu d'études sur la cartographie détaillée des zones agricoles africaines, où l'agriculture à petite échelle hétérogène est la norme (Wellens et al., 2013d) ; quelques exemples incluent les cartographies péri-urbaines, en se concentrant sur les maisons individuelles, jardins, parcs et autres aires de loisirs (Cleve et al., 2008 ; Moran, 2010 ; Jacqueminet et al., 2013). Outre la mosaïque de petites parcelles, la nature discontinue du couvert forestier dans un environnement de type savane, contribue à donner un aspect hétérogène aux images (Hulley et Setterfield, 2008) et il est difficile de délimiter les divers types de végétation. Pour ces raisons, on note peu d'intérêt pour la télédétection qui tend à favoriser les classifications automatisées rapides pour la cartographie du couvert végétal (Ruelland et al., 2010).

Lorsqu'on procède à une analyse d'images pixel basé (AIPB) dans l'optique de dresser une cartographie du couvert végétal à l'échelle communautaire, l'hétérogénéité spectrale peut conduire à des pixels mal classés qui apparaissent au sein d'une classe, créant un effet de « sel et poivre » (Blaschke

et al., 2000). L'application de l'imagerie à résolution plus élevée (pixel de moins de 5 m) reste aussi un problème car il est difficile de cartographier les classes au niveau communautaire avec précision en utilisant des méthodes pixel basées traditionnelles (Whiteside et al., 2011). En outre, lorsqu'il s'agit des paysages complexes, le plus grand niveau de détails mène à des caractéristiques complexes dans le domaine spectral. C'est parce que beaucoup de petits objets sont concentrés dans une petite zone et qu'ils deviennent de plus en plus visibles car la résolution spatiale devient de plus en plus fine, ce qui conduit éventuellement à une baisse de la précision de la classification (Myint et al., 2011).

Afin de minimiser le problème de l'hétérogénéité, différentes méthodes telles que l'utilisation de la texture dans la classification ont été examinées (Agüera et al., 2008 ; Moran, 2010). Par exemple, la matrice de co-occurrence du niveau de gris (GLCM, *grey level co-occurrence matrix*) est un résumé de la structure d'une image. La structure est l'organisation des éléments texturaux les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire les relations spatiales qui existent entre eux dans une image. Elle indique le nombre d'occurrences d'une relation entre un pixel et ses voisins. Shaban et Dierick (2001) ont mené une enquête sur les GLCM des images SPOT en milieu urbain indien. Ils ont conclu que le contraste, l'entropie, la variance et le moment inverse des différences améliorent la classification jusqu'à 17 %. Des mesures de GLCM pour la texture sont largement utilisées (Yu et al., 2006 ; Agüera et al., 2008). Dans la pratique, il est souvent difficile d'identifier une texture convenable parce que la texture varie selon les caractéristiques du paysage et les images utilisées. L'identification des textures adaptées implique, entre autres, la détermination d'une image texturée et la taille de la fenêtre mobile (Chen. et al., 2004).

L'analyse d'images objet basée (AIOB) peut servir à surmonter ces difficultés en procédant d'abord à une segmentation d'une image en clusters de pixels voisins similaires (objets) et classer ensuite les clusters selon des propriétés moyennes spectrales (ou autres). Cela réduit les variations spectrales dans les objets et permet d'utiliser d'autres relations contextuelles et topologiques (ex. à proximité de, entouré, à côté) dans la classification (Cleve et al., 2008). L'AIOB classe les régions homogènes contiguës ou objets

d'image, plutôt que de simples pixels, en recherchant des informations (forme, texture et informations contextuelles) cachées dans les spectres (Yoon et al., 2005). L'AIOB est donc en mesure d'extraire des objets du monde réel avec des classifications plus précises et des formes plus correctes, ce qui est difficile à obtenir en utilisant l'AIPB (Trimble, 2010).

Des études de comparaison des classifications pixel et objet basé montrent que cette dernière classification est généralement plus performante que la première lorsque l'on compare la précision globale (OA) de la classification, comme par exemple, des zones agricoles et des environnements urbains (Cleve et al., 2008 ; Castillejo-González et al., 2009 ; Blaschke, 2010 ; Myint et al., 2011 ; Ouyang et al., 2011 ; Whiteside et al., 2011). Les classifications objet basé produisent également un aspect visuel assez attrayant des types de couvert végétal (Duro et al., 2012).

Yang et al. (2011) citent plusieurs chercheurs qui ont montré les avantages de l'utilisation des séries temporelles d'images, prises la même année, pour cartographier les terres agricoles. Cependant, souvent seulement une scène sans nuage peut être obtenue au cours de la période de discrimination optimale (El Hadj, 2009). Des données télédéteectées sont également souvent complétées par des informations provenant d'autres sources de nature différente. Lucas et al. (2007) ont utilisé des données auxiliaires, telles que des cartes topographiques, avec une série temporelle d'images pour cartographier les habitats semi-naturels et l'occupation des terres agricoles.

Dans la présente étude, des images SPOT-5 à haute résolution ont été classifiées et comparées utilisant l'approche pixel et objet basé. Pour l'approche pixel basé, la classification par maximum de vraisemblance (MLC, *Maximum Likelihood Classification*) a été utilisée ; il s'agit d'un algorithme de classification facile à utiliser et à comprendre, disponible dans les logiciels de télédétection. L'utilisation de GLCM dans AIPB a été évaluée afin de déterminer l'hétérogénéité spatiale et d'utiliser cette information pour améliorer la classification. En outre, une analyse d'une série d'images et de données non-télédéteectées ont été utilisées pour affiner et améliorer la classification définitive. Concernant l'approche objet basé, une classification par le plus proche voisin (*Nearest Neighbour*) a été utilisée et ensuite améliorée avec l'indentification des fonctions d'appartenance (*Membership*

Functions) et des algorithmes de classification hiérarchique. L'étude visait entre autres une analyse simple d'images et des résultats satisfaisants pour tous les utilisateurs et parties prenantes.

3.2. Méthodes

3.2.1. Acquisition d'images et description du site

Une subvention a été accordée dans le cadre du programme « Incitation à l'Utilisation Scientifique des Images SPOT » (ISIS) pour la prise de plusieurs images SPOT-5 haute résolution toutes les 3-4 semaines tout au long de la saison des cultures. En raison des conditions atmosphériques et climatiques, seulement deux images SPOT-5 multi-panchromatiques (Rosak et al., 2004) ont été acquises, une le 22 janvier 2011 et l'autre le 4 avril 2011, contenant trois bandes spectrales avec une résolution de 2,5 m: vert (500-590 nm), rouge (610-680 nm) et proche infrarouge (PIR) (780-790 nm).

L'imagerie SPOT-5 a été fournie radiométriquement et géométriquement corrigée (niveau 2a). Les valeurs numériques calibrées (DN, *Digital Number*) ont été converties en radiances, comme mesurées par le capteur (Gonsamo, 2010). Une correction atmosphérique de l'imagerie n'a pas été effectuée en raison de l'absence de données spectrales terrestres ou de données météorologiques appropriées disponibles dans la zone d'étude.

Les images standards corrigées possédaient un décalage de ± 20 m et ont été corrigées géométriquement à l'aide de sept points de contrôle GPS au sol et une transformation polynômiale de premier ordre (Kardoulas et al., 1996). Les 80 points de liaison (*tie points*) suivants ont été calculés automatiquement et les images ont été co-enregistrées en utilisant une transformation polynômiale de premier ordre avec un ré-échantillonnage du plus proche voisin. L'erreur de positionnement (RSME) entre les images était de 0,5 pixel. Comme l'étude se situait sur une plaine alluviale, la topographie était presque horizontale et un ré-échantillonnage à l'aide d'un modèle numérique du terrain n'était pas nécessaire pour améliorer la rectification (Rocchini et Di Rita, 2005).

L'étude a été menée dans la zone agricole du bassin versant du Kou (11,3° N ; 4,4° O) au sud-ouest du Burkina Faso (Figure 3.1). S'étendant sur 5 x 15 km, la région fait partie de la ceinture agricole entourant la deuxième plus grande ville du pays, Bobo-Dioulasso. Elle est caractérisée par une vaste mosaïque de petites parcelles d'une superficie moyenne de 0,5 ha, rarement supérieure à 1 ha. L'eau est directement détournée, siphonnée ou pompée de la rivière et des nappes peu profondes pour l'irrigation par bassin ou à la raie.

3.2.2. Classification pixel basé

La classification pixel basé utilisait la procédure supervisée de MLC (Jensen, 2005 ; Lillesand et Kiefer, 2008), qui est la méthode de classification pixel basé la plus précise et plus largement utilisée (Ouyang et al., 2011). Des zones d'intérêt représentatives des types de couvert végétal ont été sélectionnées afin de créer les signatures spectrales des différentes classes d'occupation du sol. La MLC a ensuite été utilisée pour assigner des pixels à la classe présentant la probabilité d'appartenance la plus élevée, produisant une carte du couvert végétal pour ces classes.

Une MLC nécessite un nombre suffisant de zones d'intérêts représentatives pour chaque classe afin de pouvoir estimer avec précision le vecteur moyen et la covariance nécessaires pour l'algorithme de classification (Huber-Moy et al., 2001 ; Chen et Stow, 2002). Lorsque les zones d'intérêts sont limitées ou non représentatives, une estimation inexacte du vecteur moyen et de la covariance peut donner de mauvaises classifications.

Une carte initiale du couvert végétal a été établie contenant 40 classes spectrales à partir d'un algorithme de classification non supervisée ISODATA, avec au maximum 20 itérations et un seuil de convergence de 0,95. Ces classes ont été plus tard regroupées en cinq classes de couvert végétal, basées sur la nomenclature de CORINE utilisée par l'Institut Géographique du Burkina (Jaffrain et al., 2005): terres irriguées; forêts; savane; sols nus et eau. La classification ISODATA était ensuite convertie en polygones et importée dans un SIG. Une approche d'échantillonnage stratifié et aléatoire, inspirée de Duro et al. (2012), a été utilisée pour obtenir des échantillons appropriés des types

de couvert végétal qui étaient relativement sous-représentées dans la zone d'étude (ex. les petites exploitations).

Afin de mieux comparer les classifications pixel et objet basé, les mêmes zones d'intérêt ont été utilisées dans les deux approches. Les images SPOT étaient superposées et une segmentation multi-résolution a été réalisée avec eCognition sur tous les six bandes (voir ci-dessous) : une segmentation grossière pour la sélection des classes représentants des zones plus vastes (savane, eau, sol dénudé, forêts et plantations) et une segmentation fine pour les occupations du sol plus complexe (petites parcelles irriguées et forêts riveraines). Au moins 15 échantillons pour chaque zone d'intérêts ont été sélectionnés, avec le nombre de pixels allant de 15.399 à 246.110 (0,12 à 1,28 % du total des pixels), jugés suffisant selon Yang et al. (2011). Des matrices de divergence (*transformed divergences distances*) ont été calculées afin d'évaluer la séparabilité spectrale de toutes les classes (Richards, 1999). Toutes les valeurs de séparabilité se situaient entre 1,99 et 2,00, indiquant une bonne séparabilité des classes. Deux tiers ont été utilisés dans la classification, le tiers restant pour l'évaluation.

Plusieurs GLCM avec des tailles différentes de fenêtre ont été testées sur les trois bandes SPOT. Les mêmes zones d'intérêt ont permis de déterminer quel type de texture ou bandes d'images donnait la meilleure séparabilité à l'aide des matrices de divergence. L'image texturée présentant les meilleures séparabilités a été ensuite incorporée dans les images multi-spectrales pour la classification du couvert végétal.

Lorsque plusieurs images prises aux différents moments sont disponibles, il est possible d'utiliser les informations fournies par la série d'images pour améliorer la classification de chaque image individuelle à l'aide d'analyses multi-temporelles. Une de ces méthodes, appelée détection du changement (*change detection*), consiste à identifier les différences dans l'état d'un objet en l'observant à des moments différents (Singh, 1989). Coppin et al. (2004) présentent diverses techniques d'analyse de détections du changement. La technique adoptée dans le cadre de la présente étude repose sur une comparaison post-classification.

Traoré et al. (2013) proposent une méthode de comparaison post-classification à partir d'une analyse rétroactive et prospective des détections du

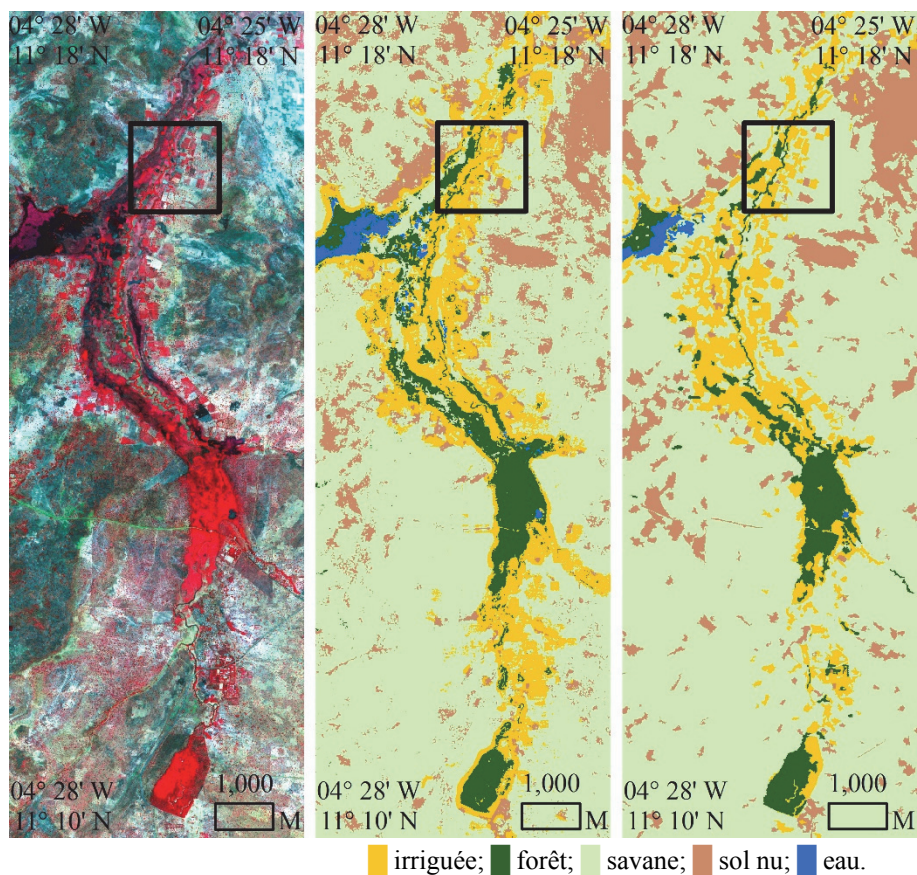


Figure 3.1 – (L): L'image SPOT-5 en composition colorée en fausses couleurs, de la zone d'étude (04/04/2011). (m): Classification pixel basé définitive de l'image SPOT-5. (r): classification objet basé de l'image SPOT 5. Le carré noir se rapporte à la carte détaillée, illustrée à la Figure 3.2.

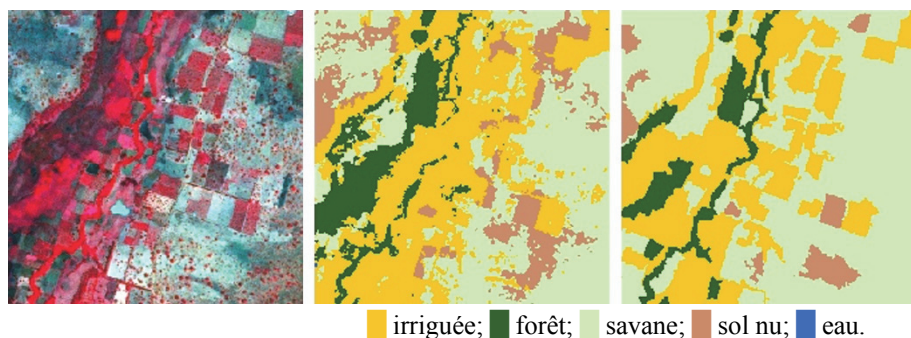


Figure 3.2 – (L): Détail de l'image SPOT-5. (m): détail de la classification pixel basé. (r): détail de la classification objet basé.

changement nécessitant de l'expertise agronomique. Selon l'analyse de trajectoires de l'occupation, la méthode relie les états consécutifs d'occupation du sol afin d'évaluer et, si nécessaire, corriger la classification. Par exemple, une zone classée avec une grande précision comme « irriguée » à un temps $t-1$ est censée rester classée comme « irriguée » à un temps t et ne peut être changée à « boisée ». Des règles de contrôle ont été établies pour corriger ces anomalies dans les trajectoires d'occupation. Ces règles sont basées sur les tendances dans la chronologie de l'utilisation des terres observées dans la zone d'étude.

3.2.3. Classification objet basé

Dans cette approche, la première étape consiste à former des régions homogènes à l'aide d'un processus de segmentation. Dans la deuxième étape, une classification est appliquée à ces objets-images à l'aide d'informations spectrales mais aussi spatiales, comme par exemple des caractéristiques de contexte, de forme et de texture.

Le processus de segmentation est un algorithme ascendant de fusion de région qui commence avec des objets d'un pixel. Le processus implique un regroupement par paires des objets plus petits dans des objets plus grands avec une texture et une couleur uniforme. La taille d'un objet-image est déterminée par le paramètre d'échelle. Plus le paramètre d'échelle est grand, plus des objets peuvent être fusionnés et plus les objets s'accroissent (Benz et al., 2004). Deux autres paramètres, la couleur et la forme, déterminent le pourcentage par lequel les valeurs spectrales et la compacité de l'objet, respectivement, contribueront au critère d'homogénéité (Castillejo-González et al., 2009). Ces paramètres définissent un seuil d'homogénéité de l'objet et indiquent la taille et la forme des objets-images qui en résultent (Benz et al., 2004 ; Trimble, 2010).

Les caractéristiques des objets sont utilisées dans la classification objet basé. Le logiciel d'analyse des images utilisé dans cette étude se réfère à des « caractéristiques » (*features*) et à un « espace des caractéristiques » (*feature space*) pour un ensemble de variables. Il existe deux options pour l'attribution des classes aux objets segmentés : une classification par plus proche voisin

(*nearest neighbor classifier*) et par fonctions d'appartenance (*membership fonctions*). La première utilise un ensemble d'échantillons qui représentent les classes afin d'y assigner des objets segmentés en fonction de leur plus proche voisin dans leurs espaces de caractéristiques. La méthode du plus proche voisin est avantageuse dans le cas de classes spectralement similaires et pas bien séparées, utilisant quelques caractéristiques ou juste une seule (Trimble, 2010). Lorsqu'on utilise la base de connaissance (*knowledge base*), les règles et les contraintes des fonctions d'appartenance sont définies afin de contrôler la classification. Les fonctions d'appartenance décrivent des fourchettes pour qu'un objet appartienne à une classe particulière ou non (Myint et al., 2011). Un des inconvénients de l'AIOB est qu'il est nécessaire d'avoir des connaissances préalables de la région et des types de couvert végétal étudiés (Tormos et al., 2011).

La capacité d'utiliser et d'établir des liens entre différents niveaux d'objets ayant des différentes échelles est aussi souvent considérée comme un avantage de l'AIOB (Blaschke, 2010). Dans une analyse hiérarchique et multi-échelle, les informations sur les objets-images à la plus petite échelle sont utilisées pour corriger et optimiser les classifications à la plus grande échelle, et les informations décrivant les objets-images à cette plus grande échelle sont utilisées pour comprendre l'image à la plus petite échelle. L'approche hiérarchique d'une segmentation multi-échelle permet donc d'améliorer l'AIOB (Myint et al., 2011 ; Ouyang et al., 2011 ; Whiteside et al., 2011 ; Duro et al. 2012).

3.2.4. *Evaluation de la précision*

Une préoccupation majeure par rapport à la télédétection est de pouvoir quantifier la coïncidence entre la carte estimée et des données réelles recueillies sur le terrain. Pour éviter une évaluation subjective, une analyse de la matrice de confusion est normalement utilisée. Celle-ci détermine la précision de la classification en comparant le pourcentage de pixels dans chaque classe avec des données réelles recueillies sur le terrain, donnant ainsi une évaluation objective et les erreurs entre les classes étudiées (Congalton et Green, 1999). La matrice de confusion fournit la précision globale (OA) de la

classification, qui indique le pourcentage de pixels correctement classifiés ; la précision du producteur (PA) et l'erreur d'omission indiquent la probabilité des zones réelles correctement classifiées ; et la précision de l'utilisateur (UA) et l'erreur de commission indiquent la probabilité que les zones classées sur la carte représentent en fait ces classes sur le terrain (Rogan et al., 2002). La valeur OA minimale standard acceptée est fixée à 85% ; si cette valeur n'est pas atteinte, une agrégation des classes ou une reclassification sont nécessaires (Foody, 2002). Le coefficient Kappa détermine si oui ou non les résultats présentés dans la matrice de confusion sont nettement mieux qu'une classification aléatoire (Congalton et Green, 1999 ; Rogan et al., 2002). Landis et Koch (1977) ont suggéré qu'un coefficient Kappa (Kc) de 0,8 indique fortement qu'une classification donnée n'a probablement pas été obtenue seulement par chance.

3.3. Résultats et discussion

3.3.1. Analyse pixel basé d'une seule image

La classification des cinq grandes catégories d'occupation du sol basée sur seulement trois bandes SPOT a donné des résultats très imprécis : OA 71,12 % et coefficient Kappa 0,59. Les informations relatives à la texture ont dû être intégrées dans l'analyse. Différentes combinaisons de mesures de textures de GLCM (moyenne, variance, homogénéité, contraste, dissimilitude, entropie, second moment et corrélation) avec des tailles de fenêtres différentes (à partir de 7 x 7 à 73 x 73) ont été testées sur les trois bandes SPOT. Pour chaque cas, les séparabilités des zones d'études ont été calculées à travers une matrice de divergence. Il a été constaté que la variance, le contraste et l'entropie avec une fenêtre mobile de 59 x 59 produisaient les meilleurs résultats : une séparabilité totale de toutes les cinq ou sept classes (voir ci-dessous). Les neuf images texturées de cooccurrence du niveau de gris produites (trois écarts, trois contrastes et trois images d'entropie), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI, *normalized difference vegetation index*) et les trois bandes SPOT ont été superposées pour former une image à 13 couches. Des arbres et des arbustes isolés, clairement présents et reconnaissables dans les savanes et

les zones irriguées, se trouvent habituellement à des distances de 30 à 50 m l'un de l'autre. Une grande fenêtre mobile de 59 x 59 (i.e., 147,5 x 147,5 m) était par conséquent nécessaire pour « quantifier » la texture hétérogène créée par ces peuplements au sein des grandes catégories de couvert végétal.

La matrice de confusion (13 bandes et 5 classes) est donnée dans le tableau 3.1. L'OA et le coefficient Kappa peuvent être considérés comme satisfaisants. Le PA et l'UA fournissent une explication plus significative pour les classes individuelles. Pour une carte destinée à être utilisée par des gestionnaires de l'irrigation, la précision des terres irriguées est loin d'être satisfaisante. Le PA est obtenu à partir des prédictions établies pour une classe et en déterminant le pourcentage de prédictions fiables. En d'autres termes, si une zone donnée est connue pour être irriguée (ex. après vérification au sol), la probabilité que la carte numérique identifie correctement cette région comme irriguée est de 75 % (trois sur quatre!). L'UA est une précision cartographique calculée à partir de données référentielles pour une classe en établissant le pourcentage de prédictions correctes. Par exemple, pour une zone irriguée figurant sur la carte, la probabilité de se trouver dans cette zone irriguée lors d'une visite de terrain à cet endroit est 78,8 % (une chance d'erreur d'un sur cinq!). Les décideurs ou gestionnaires des bassins versants souhaitaient parvenir à une identification plus précise des zones irriguées, consommatrices en eau.

3.3.2. Analyse pixel basé de multiples images

L'image du 22 janvier 2011 a été prise au tout début de la saison agricole ; dans la région d'étude, les cultures sont irriguées de janvier-février à avril-mai. Les traces de la saison des pluies étaient toujours visibles ; les valeurs NDVI étaient généralement élevées en raison de graminées entravant la classification. La classification de cette image précoce a donné des précisions semblables à celles de l'image prise plus tard : OA 76,45 % et Kappa 0,65. L'analyse de détection du changement n'a pas permis d'améliorer l'image du 4 avril 2011 à cause de ces précisions semblables. Les champs en jachère et les zones humides restantes, pas disponibles sur l'imagerie tardive, avaient des signatures spectrales très distinctes (Tableau 3.2). Des règles de détection du

changement ont été appliquées sur la transformation de ces champs en jachère en champs irrigués et des zones humides en savane.

A l'aide d'ArcGIS, la carte des 7 classes du 22 janvier 2011 et celle des cinq classes du 4 avril 2011 ont été converties en shapefiles, combinés et corrigés en suivant certaines règles simples de détection du changement:

- Les plans d'eau présents dans l'image du 4 avril 2011, sont maintenus dans la classification finale. Dans l'hypothèse que les plus larges étendues d'eau figurant sur l'image du 22 janvier 2011 ont été drainées et évaporées ;
- Sur l'image du 4 avril 2011, les forêts et les sols nus figuraient avec une grande précision (90,9 % et 88,1 %). Ces classes sont donc restées dans l'image finale ;
- Dans l'image du 22 janvier 2011, les zones humides étaient très distinctes (91,4 %), mais étaient absentes sur l'image de 4 avril 2011. On a supposé que ces zones humides ne peuvent pas être transformées en surfaces cultivées en raison d'éventuels problèmes d'engorgement, donc elles se sont transformées en savanes sur l'image finale ;
- Sur l'image du 22 janvier 2011, les champs en jachère ont été cartographiés avec assez de précision (76,6 %) par rapport aux superficies irriguées cartographiées sur l'image du 4 avril 2011. De même, les zones en friche ont par conséquent été converties en zones irriguées ;
- Tous les polygones non renseignés restants ont été définis comme de la savane.

Une opération de « nettoyage » a été réalisée dans ArcGIS. Tous les polygones plus petits que 9 pixels ont été tout d'abord « éliminés » (i.e. ils ont été fusionnés avec les polygones voisins ayant la plus longue frontière commune). Ensuite, toutes les zones irriguées situées à plus de 1 km de la rivière (indiquée sur la carte topographique) ont été converties en savane. Aucune irrigation n'est possible à une telle distance de la rivière et par conséquent aucune zone cultivée et irriguée ne peut exister dans ces régions.

La matrice de confusion de l'image corrigée après la détection du changement du 4 avril 2011 est présentée dans le Tableau 3.3. La précision globale (OA) et le Kappa ont été légèrement améliorés, de 86,45 à 89.34 % et

Tableau 3.1 – Précision globale (OA), précision du producteur (PA), précision de l'utilisateur (UA) et coefficient Kappa pour la classification pixel basé par maximum de vraisemblance (MLC), pour 5 classes utilisant 13 bandes (04/04/11).

Classification	Référence (%)				Précision du producteur (%)		Précision de l'utilisateur (%)	
	Irriguée	Forêt	Savane	Sol nu	Eau			
Irriguée	75.34	9.07	5.30	1.52	0.00	75.34	78.83	
Forêt	12.36	90.93	0.35	0.00	0.00	90.93	80.53	
Savane	12.25	0.00	88.49	10.37	0.00	88.49	92.60	
Sol nu	0.05	0.00	5.86	88.11	0.00	88.11	77.55	
Eau	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	100.00	

Précision globale = 86,45 %
Coefficient Kappa = 0,79

Tableau 3.2 – Précision globale (OA), précision du producteur (PA), précision de l'utilisateur (UA) et coefficient Kappa pour la classification pixel basé sur par maximum de vraisemblance (MLC), pour 7 classes utilisant 13 bandes (22/01/11).

Classification	Référence (%)							Précision du producteur (%)		Précision de l'utilisateur (%)	
	Irriguée	Jachère	Forêt	Savane	Sol nu	Eau	Zone humide				
Irriguée	64.65	20.11	11.99	5.20	0.83	0.00	5.12	64.65	66.99		
Jachère	0.37	76.60	2.50	3.60	0.00	0.00	1.48	76.60	53.14		
Forêt	22.96	2.10	84.12	3.18	0.00	0.00	0.36	84.12	64.67		
Savane	2.38	0.74	0.81	78.94	37.62	0.00	1.67	78.94	89.63		
Sol nu	0.22	0.00	0.00	7.28	61.55	0.00	0.00	61.55	63.88		
Eau	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	100.00	100.00		
Zone humide	9.42	0.45	0.58	1.81	0.00	0.00	91.37	91.37	68.55		

Précision globale = 76.72 %
Coefficient Kappa = 0,68

Tableau 3.3 – Précision globale (OA), précision du producteur (PA), précision de l'utilisateur (UA) et coefficient Kappa pour la classification pixel basé après analyse de détection du changement (04/04/11).

Classification	Référence (%)				Précision du producteur (%)	Précision de l'utilisateur (%)
	Irriguée	Forêt	Savane	Sol nu		
Irriguée	84.36	9.86	3.95	0.62	84.36	83.52
Forêt	5.79	90.14	0.21	0.00	90.14	89.58
Savane	9.83	0.00	90.41	10.00	90.41	93.71
Sol nu	0.02	0.00	5.43	89.38	89.38	19.11
Eau	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00
Précision globale = 89.34 %						
Coefficient Kappa = 0,84						

Tableau 3.4 – Précision globale (OA), précision du producteur (PA), précision de l'utilisateur (UA) et coefficient Kappa pour la classification objet basé pour 5 classes (04/04/11) utilisant 4 bandes (3 bandes SPOT et NDVI).

Classification	Référence (%)				Précision du producteur (%)	Précision de l'utilisateur (%)
	Irriguée	Forêt	Savane	Sol nu		
Irriguée	93.94	3.77	2.38	0.00	93.84	93.84
Forêt	3.03	96.23	0.00	0.00	96.23	95.05
Savane	3.03	0.00	96.10	0.00	96.10	98.90
Sol nu	0.00	0.00	1.52	100.00	100.00	100.00
Eau	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00
Précision globale = 96.13 %						
Coefficient Kappa = 0,94						

de 0,79 à 0,84, respectivement. Cependant, la précision pour les zones irriguées a évolué de façon consistante : une augmentation de 9 % (de 75,3 à 84,4 %) de la PA. Toutes les autres classes sont restées intactes. La classification finale peut être considérée comme bonne (Figure 3.1).

3.3.3. *Analyse objet basé*

Les valeurs appropriées des paramètres pour la segmentation multi-résolution ont été sélectionnées par une approche itérative d'essais et erreurs, avec interprétation visuelle, souvent utilisée en AIOB (Ouyang et al., 2011 ; Whiteside et al., 2011 ; Duro et al., 2012). Une fois que le paramètre d'échelle était déterminé, les autres paramètres étaient modifiés par itération afin d'affiner la forme de l'objet. La segmentation a été considérée comme terminée lorsque les objets-images produits correspondaient visuellement aux objets concrets et réels. Les valeurs retenues étaient : échelle 10, couleur 0,1 et forme 0,5. On a eu recours à une deuxième segmentation plus grossière pour l'analyse hiérarchique multi-échelle en utilisant les paramètres suivants : échelle 30, couleur 0,3 et forme 0,5.

Dans les premiers essais, les classifications par le plus proche voisin et par des fonctions d'appartenance ont été établies séparément. Les résultats n'ont pas amélioré la classification pixel basé : en ce qui concerne la méthode du plus proche voisin, l'OA était 89,13 % et le coefficient Kappa 0,82, et pour la procédure par fonctions d'appartenance l'OA atteignait 73,65 % et le coefficient Kappa 0,59. Les contrôles visuels suggéraient une complémentarité entre les deux cartes d'occupations du sol ; la savane était la mieux classée selon la procédure du plus proche voisin et les parcelles irriguées étaient mieux classées selon la classification par fonctions d'appartenance. Il a donc été décidé de combiner les deux approches.

La classification par le plus proche voisin a été réalisée au niveau du plus petit objet-image. L'espace des caractéristiques optimales pour la classification supervisée par le plus proche voisin a été identifié grâce au module d'optimisation d'espace des caractéristiques (FSO, *Feature Space Optimization*), un outil d'aide de classification dans le logiciel eCognition. En utilisant les mêmes zones d'intérêt de l'approche pixels basé, la FSO a calculé

Tableau 3.5 – Caractéristiques dans l’approche optimisée par le plus proche voisin et fonctions d’appartenance.

Classification objet basé	Classes	Caractéristiques
Plus proche voisin		Différence moyenne par rapport aux voisins pour la bande 2 ; Valeur moyenne de la bande 3 ; Valeur moyenne de la bande 4 ; Ecart-type de la bande 3 ; Ecart-type de la bande 4 ; Différence maximale en luminosité ; Longueur/Largeur ; Forme rectangulaire.
Fonctions d’appartenance	Eau	Luminosité ; Rapport bande 1 et somme des bandes ; Superficie relative des sous-objets «eau».
	Sol nu	Valeur moyenne de la bande 2 ; Valeur moyenne de la bande 4 ; Superficie relative des sous-objets «sol nu».
	Irriguée	Valeur moyenne de la bande 4 ; Rapport bande 2 et somme des bandes ; Superficie relative des sous-objets «irrigué».
	Forêt	Valeur moyenne de la bande 2 ; Valeur moyenne de la bande 4 ; Superficie relative des sous-objets «forêt».
	Savane	Superficie relative des sous-objets «savane».

pour une dimension spécifiée un sous-ensemble de l'espace des caractéristiques ayant la plus grande séparabilité dans la gamme de variables spectrales, contextuelles, de textures et de formes disponibles (Trimble, 2010). La dimension de l'espace des caractéristiques optimales a été définie à huit caractéristiques, car des tests précédents ont montré qu'une augmentation du nombre de caractéristiques n'améliorait pas la précision de la classification. Les caractéristiques des objets utilisées dans la classification par le plus proche voisin sont répertoriées dans le Tableau 3.5.

A un autre niveau, utilisant la même segmentation multi-résolution, une classification par fonctions d’appartenance a été mise au point. La sélection des caractéristiques appropriées peut être un processus subjectif basé sur l'expérience et les connaissances de l'utilisateur, ou guidé par un algorithme de sélection de caractéristiques (Duro et al., 2012). L'éditeur d'échantillons (*Sample Editor*) a été utilisé pour trouver les meilleures caractéristiques afin de différencier complètement les différentes classes. Les caractéristiques des

objets permettant de classer chaque classe sont données dans le Tableau 3.5. Près de 80 % des objets-images ont pu être classés avec une quasi-certitude.

Les objets-images au niveau de la segmentation plus fine ont servi de composantes sous-jacentes (Castilla et Hay, 2008) dans la classification finale du niveau supérieur de l'image grossièrement segmentée. En tenant compte de la présence prédominante de sous-objets, classés aux niveaux inférieurs par le plus proche voisin et des fonctions d'appartenance, chaque objet-image moins fin (sous-objet) a été attribué à une classe définitive de couvert végétal au niveau de la segmentation grossière. La carte d'occupation du sol qui en résulte est montrée dans la Figure 3.1. La précision de la classification a été évaluée à l'aide des mêmes zones d'intérêts de validation comme dans l'approche pixel basé et donnée dans le Tableau 3.4. L'OA est 96,13 et le coefficient Kappa 0,94 ; l'OA et l'UA pour les zones irriguées sont 96,23 % dans les deux cas. Comme suggéré dans la littérature citée plus haut, l'AIOB était plus performante que l'AIPB, les matrices de confusion et les cartes montrent une meilleure différenciation entre zones irriguées et savane. Dans la Figure 3.2, les détails des cartes montrent également un résultat visuellement plus attrayant et plus réaliste pour l'AIOB ; avec des frontières plus précises et naturelles entre les différentes classes.

Il est à noter que les caractéristiques utilisées dans cette étude étaient toutes liées aux caractéristiques spectrales, de texture et de forme. Aucune caractéristique texturale « directe » n'a été utilisée, bien que toutes les caractéristiques aient été initialement essayées avant de déterminer la stratégie finale. L'information texturale figurait, cependant, dans les processus de segmentation.

4. Conclusions

La cartographie des paysages agricoles complexes africains utilisant l'imagerie à haute résolution est souvent peu attrayante pour les analystes en télédétection en raison de l'absence d'une procédure automatisée pour classer des terres agricoles hétérogènes et boisées, caractéristique pour le continent. Une approche de classification pixel basé facile à utiliser a été comparée à une approche objet basé beaucoup plus complexe (et coûteuse).

Lorsqu'on appliquait une MLC pixel basé sur uniquement les trois bandes de base d'une image SPOT-5 haute résolution, l'hétérogénéité de l'image due à la présence d'arbres et d'arbustes sur l'ensemble du paysage rendait la classification plus difficile et donnait des précisions insuffisantes. L'utilisation de GLCM permettait de résoudre ce problème, transformant l'hétérogénéité en un atout pour obtenir une classification plus précise. Quand plusieurs images étaient disponibles au cours de la saison agricole, la détection du changement post-classification et des règles de connaisseur aidaient à améliorer la classification finale. Dans les cas où certaines signatures spectrales étaient plus distinctes dans une image, cette information servait à corriger ou confirmer les classifications sur une autre image.

Comme prévu, l'approche objet basé a légèrement été plus performante que l'approche pixel basé, mais seulement lorsque les algorithmes du plus proche voisin et des fonctions d'appartenance ont été combinés. En outre, la carte de l'occupation du sol était visuellement plus attrayante, avec des délimitations de paysage plus claires et plus reconnaissables. Le processus, cependant, était beaucoup plus laborieux surtout en ses phases de définition des paramètres de segmentation les plus réalistes et de sélection des caractéristiques d'objets les plus appropriées. Des compétences d'utilisateurs et de la disponibilité de logiciels spécialisés sont néanmoins requises.

Nonobstant l'application de filtres appropriés lors de la pré-analyse de l'image et quelques traitements post-classification, la classification pixel basé reste la plus facile à utiliser et produit des résultats de classification acceptables. Il est préférable d'adopter cette approche au Burkina Faso comme elle prend en compte les ressources techniques localement disponibles, garantissant ainsi l'autonomie et la durabilité.

4 Une méthode simple et peu coûteuse pour le pré-traitement et l'adaptation des photographies aériennes amateur pour l'évaluation des terres irriguées³

Au cours de ces dernières décennies, le bassin versant du Kou, dans le sud-ouest du Burkina Faso connaît une mauvaise gestion de l'eau. Malgré l'abondance de l'eau, la plupart des utilisateurs de l'eau font régulièrement face à des pénuries en raison d'une intensification des superficies irriguées. Pour la mise en place d'une répartition plus équitable des terres irriguées, les acteurs locaux ont besoin d'un outil à faible coût, pour la surveillance et la cartographie de ces zones irriguées. Le but de la présente étude était d'établir une procédure rapide et peu onéreuse pour le mosaïquage et le géoréférencement des photographies aériennes amateur à petite échelle dans le cadre d'études d'utilisation des terres. Des dizaines en 2009 et des centaines en 2007 de photographies aériennes prises à basse altitude avec une résolution de 0,4 m et 0,8 m respectivement, ont été utilisées pour dresser une cartographie détaillée du couvert végétal des petites parcelles irriguées qui caractérisent l'agriculture irriguée en Afrique. Un outil de mosaïquage et un SIG ont permis de créer des « mono-images » géoréférencées ; les deux mosaïques ont été géoréférencées sur une image SPOT haute résolution avec un erreur-type horizontale (RMSE) d'environ 11 m. Le RMSE entre les deux mosaïques étaient de 2 m. Cette approche est moins sensible aux conditions atmosphériques qui sont imprévisibles pendant la programmation des images satellites.

³ Adapté de: Wellens, J., Midekor, A., Traoré, F., Tychon, B., 2013. An easy and low-cost method for preprocessing and matching small-scale amateur aerial photography for assessing agricultural land use in Burkina Faso. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 237-278.

4.1 Introduction

Les terres irriguées en Afrique subsaharienne devraient augmenter de 28 % d'ici 2030 (FAO, 2002). Dans l'Afrique de l'Ouest semi-aride, la rapide croissance démographique, les sécheresses récurrentes et la baisse continue de la production vivrière par habitant, ont conduit à un nouvel appel pour le développement de l'irrigation (Urama, 2005). Au sud-ouest du Burkina Faso l'intensification des zones agricoles a entraîné une pression accrue sur les terres et l'eau disponibles, accompagnée par une dégradation de l'environnement et une résurgence de conflits liés à l'eau. La nécessité d'outiller les acteurs locaux (i.e. les structures décentralisées de l'état chargées de l'agriculture et de l'environnement) de technologies faciles à utiliser et peu coûteuses se posait par conséquent, afin de leur permettre d'assurer la surveillance des zones irriguées et d'en dresser la cartographie.

À l'échelle régionale, des cartes sur l'occupation des terres et le couvert végétal sont généralement produites à partir d'analyses d'images satellites. Bien qu'il existe des programmes nationaux et régionaux de cartographie (ex. Jaffrain et al., 2005 ; Siebert et al., 2013), ces capteurs de télédétection sont conçus pour couvrir de vastes zones et donc ne peuvent pas fournir suffisamment de détails. L'agriculture irriguée au Burkina Faso est caractérisée par une mosaïque de petites parcelles très hétérogène avec une taille moyenne de 0,5 ha et rarement supérieure à 1 ha. Lorsque de l'imagerie satellite standard est utilisée, sa résolution spatiale de 10 à 90 m/pixel pourrait être trop grossière pour cartographier la complexité des sous-pixels (Foody, 2000). La taille des objets doit être au moins 3 - 4 fois supérieure à la taille de pixel (résolution) de l'image satellite (Lillesand et al., 2004). L'apport d'images haute résolution (SPOT) à très haute résolution (Ikonos, QuickBird) pourrait constituer une solution, mais elles sont coûteuses et donc pas accessibles à tout le monde. En outre, des conditions climatiques défavorables imprévues, tels que des nuages et de la poussière peuvent dégrader la qualité des images et réduire considérablement leur utilité. Le nuage de points dans la Figure 4.1 montre la variation des heures d'insolation journalière pendant la saison d'irrigation (janvier-mai) au Burkina Faso. D'un jour à l'autre, les heures d'insolation peuvent chuter de 10 heures à 5 heures ou moins. Dans de

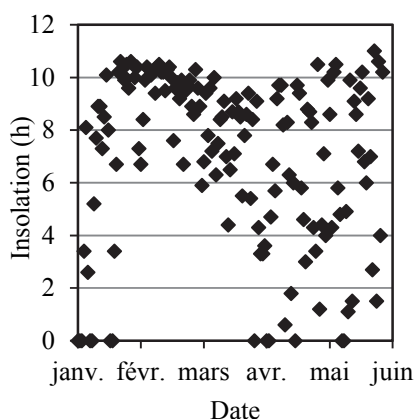


Figure 4.1 – Variation des heures quotidiennes d'insolation pendant la saison d'irrigation pour l'année 2007 au Burkina Faso.

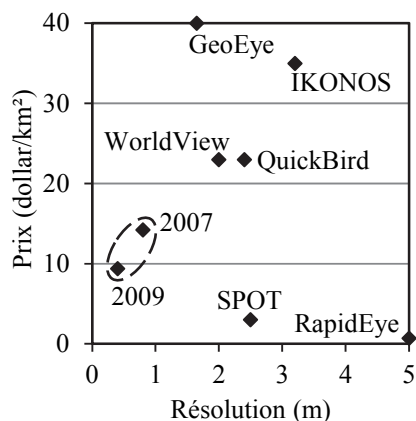


Figure 4.2 – Comparaison prix (dollar/km²) vs résolution (m) des mosaïques (2007 et 2009) et des images satellitaires (Astrium, 2012 ; Terre Info, 2012 ; RapidEye, 2012).

telles conditions climatiques, il y a un risque financier à programmer plusieurs mois à l'avance la prise d'images satellites.

Wentz et al. (2006) concluaient que pour cartographier des occupations des sols très complexes, des photographies aériennes étaient nécessaires, palliant ainsi le problème de l'hétérogénéité de sous-pixels des images satellites classiques. Pour le monitoring de la végétation sur de grandes superficies, des photographies aériennes peuvent être mosaïquées (Baker et al., 1995). Trois types de mosaïques peuvent être différenciées: contrôlées, semi-contrôlées et non contrôlées. Toutes les photographies aériennes sont soumises à des distorsions et déformations dues au relief de la zone photographiée et à l'inclinaison de l'avion (lorsqu'il n'est pas parfaitement horizontal au moment de la prise de vue) (Warner et al., 1996). Dans les mosaïques contrôlées, les photos sont corrigées en tenant compte de la déformation de dénivelée et de l'inclinaison, et ensuite géoréférencées à l'aide de logiciels spécifiques (ex. ENVI, ERDAS-OrthoBase, PCI), donnant une « mosaïque d'ortho-photos ». Toutes les distances, angles et positions peuvent être mesurés avec précision à l'aide d'une ortho-photo. Cette approche est la plus précise, mais elle nécessite des données auxiliaires qui ne sont souvent pas disponibles: des points de contrôle au sol ; des modèles numériques de terrain (MNT) ; les rapports de calibrage de la caméra ; et l'orientation externe, définissant la

position et l'angle de la caméra pour chaque photo (ERDAS, 2002). A l'inverse, on trouve la mosaïque non contrôlée, qui peut être produite rapidement ; l'utilisateur oriente simplement les images jusqu'à l'obtention d'une plus grande image. Une mosaïque semi-contrôlée est une mosaïque non contrôlée améliorée, où les bords des images sont correctement alignées utilisant des logiciels de panorama pour créer des mosaïques de photos. Des cartes thématiques ou des images satellites peuvent fournir les points de contrôle au sol pour le géoréférencement.

Rocchini et Di Rita (2005) ont montré que pour des terrains plats telles que des plaines alluviales, comme dans le cas de la zone d'étude, le ré-échantillonnage avec un MNT n'améliorait pas la méthode de rectification. Uniquement l'utilisation de fonctions polynômiales a confirmé leur capacité de rectification dans le cas des terrains plats.

Dans la littérature, on dispose de plusieurs études sur la photo-interprétation ou le traitement des photographies aériennes de haute qualité pour la cartographie détaillée de l'occupation du sol. La plupart d'entre elles traite d'environnements estuariens (ex. Zharikov et al., 2005 ; Raal et Burns, 1996), urbains (ex. Wentz et al., 2006 ; Cleve et al., 2008) ou forestiers (ex. Carreiras et al., 2006). Dans le domaine de l'agriculture, on peut avoir recours à la photographie aérienne utilisant des appareils de pointe pour le monitoring des cultures sur des parcelles expérimentales ou pour la gestion commerciale (Oberthür et al., 2007 ; Peña-Barragán et al., 2004 ; Rabatel et al., 2008). Une des rares études sur l'utilisation de la photographie aérienne pour la cartographie des terres agricoles en Afrique a été réalisée par Rembold et al. (2000).

Dans le cas du Burkina Faso, l'absence d'imagerie aérienne de haute qualité ou d'avions équipés de « systèmes de GPS cinématique aéroporté » limite la capacité de mener des levés détaillés de l'occupation du sol. Le but de la présente étude était donc de concevoir une procédure rapide et peu coûteuse pour le mosaïquage semi-contrôlé et le géoréférencement de photographies aériennes amateurs de petite échelle pour les relevés topographiques, et le suivi et le contrôle de l'utilisation des terres. Deux ensembles de dizaines (2009) et des centaines (2007) de photographies aériennes prises à basse altitude, avec une résolution de 0,4 m et 0,8 m respectivement, ont été utilisés

pour la cartographie détaillée des petites parcelles irriguées. Un outil de mosaïquage disponible sur le marché et un SIG ont permis de produire une image unique géoréférencée. Pour des études de classification plus poussées (qui n'entrent pas dans le cadre de cette étude), on a également considéré une harmonisation des balances des couleurs des différentes photographies.

4.2 Zone d'étude

L'étude a été réalisée dans la zone agricole du bassin versant du Kou (11,3° N ; 4.4° O) au sud-ouest du Burkina Faso. Etant principalement une plaine inondable, la zone d'étude se caractérise par une surface topographique homogène de $\pm 200 \text{ km}^2$.

Au cours de ces dernières décennies, le bassin versant du Kou a connu une pauvre gestion de l'eau. Malgré l'abondance de l'eau, la plupart des utilisateurs de l'eau font régulièrement face à des pénuries d'eau en raison de l'augmentation des superficies des cultures irriguées. Ces dernières années, les acteurs locaux ont acquis des outils d'aide à la décision pour les aider à surveiller efficacement les ressources en eau et leur utilisation (Wellens, 2013).

4.3 Matériels et méthodes

4.3.1 Acquisition d'images

Un caméraman, accompagnant le pilote, a fait l'acquisition d'images couleurs à l'aide d'une caméra numérique ordinaire munie d'une télécommande et montée sur un petit avion : un Morane Saulnier 180 GT en 2007 et un Cessna de 117 en 2009. En 2007, une caméra numérique Sony DSC-P92, équipée d'un capteur de données CCD de 1/1,8 po (7,18 x 5,32 mm) produisant des images de 2.048 *colonnes* x 1.536 *lignes*, a été utilisé. L'objectif intégré a été réglé sur une focale fixe de 8 mm. Pour le levé de 2009, un Canon EOS 450 D, avec un capteur d'image CMOS de 22,2 x 12,4 mm produisant 4.272 *colonnes* x 2.848 *lignes*, avec une longueur focale de 19 mm a été utilisé.

Un plan de vol a été calculé, en tenant compte de paramètres tels que la distance focale de la caméra (f , en mm), la taille du capteur numérique ($S'_l \times S'_h$, en mm x mm), la vitesse de vol (V_g , en kilomètres/heure), l'altitude (H_g , en m), le chevauchement longitudinal (p , en %) et latéral (q , en %) (Warner et al., 1996), par lesquelles:

- distance au sol (S , en m):

$$S = \frac{S'_l \times H_g}{f} \quad (4.1)$$

- longueur de la base (B , en m) avec chevauchement longitudinal p :

$$B = S \left(1 - \frac{p}{100} \right) \quad (4.2)$$

- distance entre les lignes de vol (A , in m) avec chevauchement latéral q :

$$A = S \left(1 - \frac{q}{100} \right) \quad (4.3)$$

- intervalle d'exposition en secondes (ΔT):

$$\Delta T = \left(\frac{B}{V_g} \right) \quad (4.4)$$

- résolution au sol (R_g , in m):

$$R_g = \frac{S'_l \times H_g}{Col \times f} \quad (4.5)$$

Les résultats, présentés dans le Tableau 4.1, ont été obtenus avec le logiciel ArcGIS (ESRI) sur une image Landsat TM archivée. Les lignes de vol résultantes, avec des points indiquant les moments d'exposition, ont été exportées vers un GPS (GPS Garmin-92) pour le guidage du pilote et du caméraman. Lorsque les conditions atmosphériques étaient jugées non optimales, le vol était reporté au lendemain afin d'éviter des effets négatifs sur la qualité de l'imagerie aérienne. Des vols matinaux ont été préférés pour éviter des turbulences causées par le rayonnement thermique de la surface de la terre.

Tableau 4.1 – Calculs des plans de vol pour les levés de 2007 et 2009.

	2007	2009
Hauteur de vol H_g (m):	1800	1300
Vitesse de vol V_g (km/h):	180	200
Longueur focale f (mm):	8	19
Taille du capteur photographique S'_l (mm):	7.18	22.2
Taille du capteur photographique S'_h (mm):	5.32	14.8
Chevauchement longitudinal p (%):	40	40
Chevauchement latéral q (%):	50	40
Colonnes de l'image Col (-):	2048	4272
Lignes de l'image Row (-):	1536	2848
Distance au sol S_l (m) (Eq. 4.1) :	1616	1519
Distance au sol S_h (m) (Eq. 4.1) :	1197	1013
Longueur de la base B (m) (Eq. 4.2) :	718	608
Distance entre les lignes A (m) (Eq. 4.3) :	808	911
Intervalle d'exposition ΔT (s) (Eq. 4.4) :	14.4	10.9
Résolution au sol R_g (m) (Eq. 4.5) :	0.79	0.36

4.3.2 Assemblage d'images

Pour le levé de mi-avril 2007 (saison d'irrigation), deux vols, de 2 heures chacun, ont permis de prendre 305 vues aériennes avec une résolution de 0,8 m, sur une zone de 188 km². Une étude détaillée d'une sous-zone a été réalisée en mi-avril 2009 avec un appareil photo plus performant, pour obtenir une résolution spatiale plus fine (0,4 m). Ainsi, un vol d'1 heure a donné 100 images aériennes pour une zone de 60 km². Toutes les images ont été pivotées Nord-Sud, suivant l'orientation des lignes de vol, avant d'être mosaïquées à l'aide d'un logiciel ordinaire, mais très performant, de panorama de photos, Panorama Tools graphical user interface (PTgui) (New House Internet Services, 2010).

PTgui permet d'assembler plusieurs lignes et colonnes d'images. Les images sont parfaitement juxtaposées et fusionnées. Les caractéristiques de la caméra sont tirées du programme. La procédure est complètement automatique. En cas de besoin, ou lorsque des résultats de meilleure qualité sont nécessaires, l'opérateur peut intervenir à différents niveaux : ajouter ou corriger des points de liaison ; choisir une projection (ex. rectiligne, cylindrique, circulaire) ; ou ajuster les balances des couleurs. Des infos sur

l'orientation externe au moment de l'exposition ou des points de contrôle au sol nécessaires pour les produire, ne sont pas nécessaires dans cette approche.

4.3.3 Géoréférencement d'images et précision spatiale

Les photographies aériennes sont caractérisées par des distorsions géométriques (causées par des effets de l'objectif, de l'inclinaison et du relief) qui doivent être corrigées avant que les images soient utilisées comme photo-cartes géo-référencées (Aber et al., 2010). Des points de contrôle au sol, provenant de couches de données vectorielles ou de format raster géoréférencées, ou de levés GPS, servent à corriger ces distorsions. Des études antérieures où la correction et le géoréférencement des photographies aériennes étaient nécessaires, ont proposé l'utilisation de 8 à 10 points de contrôle répartis uniformément sur chaque scène, produisant ainsi des RMSE cumulatifs horizontaux de $\pm 10-18$ m (Kadmon et Harari-Kremer, 1999 ; Zharikov et al., 2005).

Dans la présente étude, les mosaïques créées, plutôt que les images, sont géoréférencées, ce qui a permis de gagner du temps et a considérablement facilité la procédure souvent longue utilisant un logiciel classique de télédétection. Bien que PTgui ait corrigé la plupart des distorsions pour former une mono-image homogène, des distorsions planimétriques entre les images restent présentes.

Une image SPOT panchromatique de 2,5 m de résolution (2007/12/11), préalablement corrigée géométriquement à l'aide de sept points de contrôle de GPS et une transformation polynômiale du premier degré (Kardoulas et al., 1996), a été utilisée pour géoréférencer les mosaïques semi-contrôlées. Pour le géoréférencement de la mosaïque de 2007, 743 points de contrôle ont été sélectionnés et 444 ont été sélectionnés pour la mosaïque de 2009. Etant donné que la plupart des points de contrôle se situent dans les zones de chevauchements des images, ce montant de points de contrôle est conforme à la littérature. Le RMSE horizontal résultant des deux mosaïques était d'environ 11 m. Les imprécisions de positionnement se sont révélées plus fortes sur les bordures des mosaïques que dans leurs zones intérieures, à cause de leurs parallaxes. Compte tenu de la planéité de la zone d'étude (i.e. une

plaine alluviale), la correction des effets de relief a été jugée inutile (Rocchini et Di Rita, 2005).

La précision du co-enregistrement spatial entre les mosaïques de 2007 et 2009 a été brièvement évaluée par le biais de 12 points de contrôle répartis dans les zones intérieures des mosaïques (i.e. les zones d'intérêt et les régions irriguées). En raison de la position intérieure des points de contrôle, le RMSE entre les deux mosaïques est revenu à 2 m.

4.4 Résultats et discussion

4.4.1 Evaluation de la qualité

Une scène détaillée de la mosaïque 2009, affichée par rapport aux contours des mosaïques, est présentée dans la Figure 4.3. De petites parcelles (vides ou occupées), des arbres isolés et ceux qui bordent les champs et les berges, et d'autres occupations de sol sont tous faciles à distinguer. La qualité de la mosaïque complète de 2009 peut être étudiée dans un environnement de type Google Earth sur le site internet www.ge-eau.org.

La Figure 4.4 montre la comparaison d'une image Landsat 5 TM (résolution de 30 m), avec une photographie aérienne commerciale (résolution



Figure 4.3-Détail de la mosaïque 2009 affiché par rapport aux contours des mosaïques de 2007 (rouge) et de 2009 (vert).

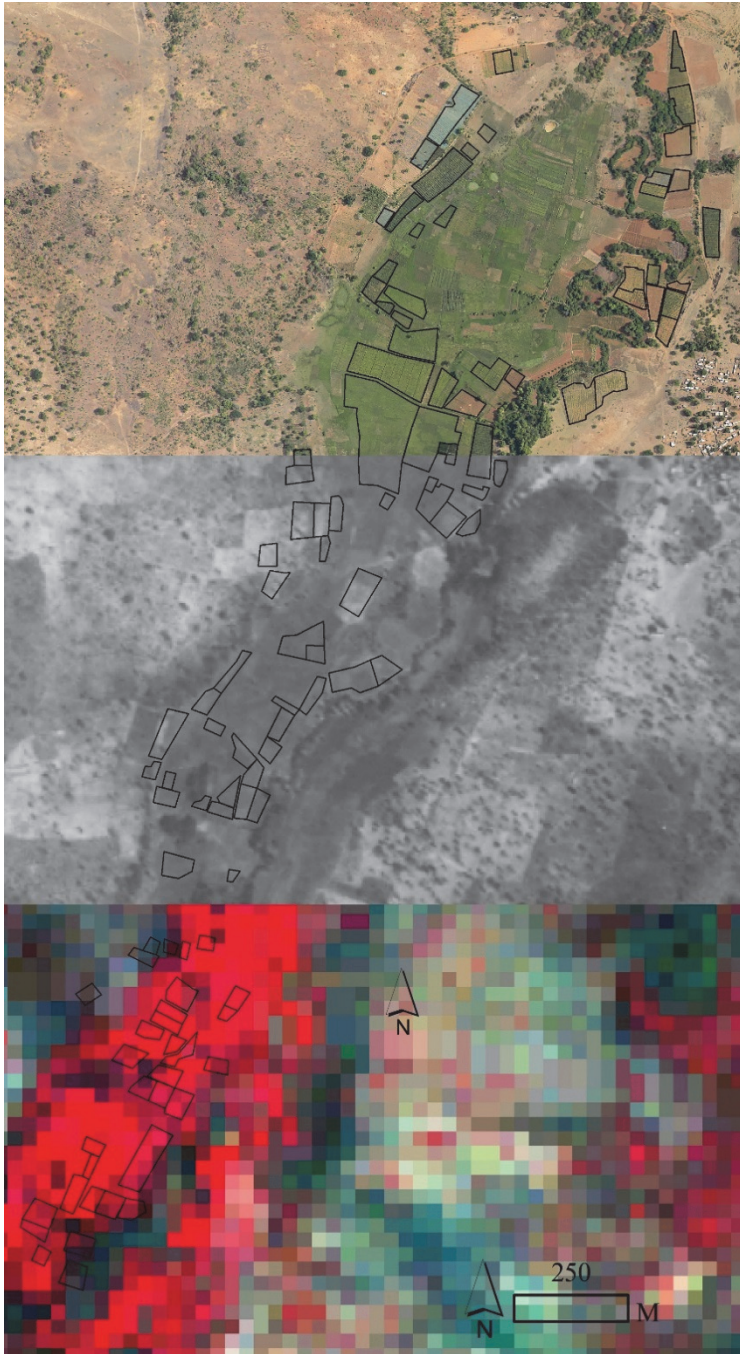


Figure 4.4 – Comparaison d'une image Landsat 7 avec une résolution de 30 m (en bas), une photo aérienne commerciale de l'IGB avec une résolution de 5 m (au milieu) et le détail de la mosaïque avec une résolution de 0,4 m (en haut), avec quelques parcelles délimitées.

de 5 m) et l'image mosaïquée de 2009 (0,4 m de résolution) pour la même région. A l'exception de la mosaïque, toutes les images sont archivées et ne sont malheureusement pas disponibles pour la même période. Certaines parcelles, reconnues pour ne pas avoir changé depuis quelques années, ont été délimitées manuellement pour une évaluation visuelle de la qualité des différentes images. L'image Landsat est clairement trop grossière pour toute identification et classification de parcelles individuelles. En images archivées, les données ne sont également pas toujours disponibles pour la période souhaitée (saison d'irrigation). La photographie aérienne a été achetée en format papier auprès de l'Institut Géographique du Burkina Faso (IGB). Elle a été scannée à 300 ppp pour donner une résolution au sol de ± 5 m (ERDAS, 2002) et ortho-rectifiée à l'aide de points de contrôle de GPS. Aucune orientation externe ou rapport de caméra n'étaient disponibles. La résolution plus fine permet une délimitation des parcelles, mais la qualité globale reste insatisfaisante en raison de la numérisation et l'absence de couleur. La qualité de l'image mosaïquée est meilleure que les deux autres formats en termes de résolution et de couleur.

4.4.2 Evaluation des coûts

Les coûts de production de mosaïques, la location d'avion et le temps de traitement ont été estimés et comparés avec ceux d'images satellites à haute résolution disponibles. Le Tableau 4.2 donne un aperçu du temps pour la production des mosaïques en ce qui concerne la planification de vol, le pilotage, les prises de photos, l'assemblage et le géoréférencement. La location de l'avion était de 360 dollars/heure et les honoraires de l'analyste sont estimés à 25 dollars/heure ; ce qui a permis de calculer un coût global. Le coût total des mosaïques à très haute résolution était de 853 dollars pour l'image de 2007 (60 km²) et de 1.768 dollars pour l'image de 2009 (188 km²).

La Figure 4.2 donne une comparaison « prix/km² vs. résolution » entre les mosaïques et des images satellites (basée sur les prix fournis par Land Info, 2012 ; RapidEye, 2012 ; Astrium, 2012) ; ce qui montre que la production d'une mosaïque est préférable à l'utilisation d'images satellites en termes de prix et de résolution. Des superficies minimales, comprises entre 100 km² à

Tableau 4.2 – Evaluation des coûts de production de mosaïques,
en heures et en dollars.

Mosaïque	Heures	
	2007	2009
Plan de vol	1	1
Pilote	2	3.5
Caméraman	1.5	3
Analyste (PTgui)	4	10
Analyste (SIG)	4	10
Total	12.5	27.5
	Coûts (dollar)	
	2007	2009
Hommes-heures (25 dollar/h)	313	688
Avion	540	1080
Total	853	1768

Tableau 4.3- Liste de prix minimum d'images satellites.

Image satellite	Rés. (m)	Prix (dollar)
GeoEye	1.65	4000
WorldView	2	2300
QuickBird	2.4	2300
SPOT	2.5	3860
IKONOS	3.2	3500
RapidEye	5	2450

3,500 km², sont requises pour l'achat des images satellites ; les prix minimaux pour des images satellites sont donnés au Tableau 4.3. Une fois de plus, ces prix sont bien supérieurs aux coûts de production de mosaïques.

4.4.3 Evaluation de la précision

Le RMSE de 2 m (5 pixels de 0,4 m) entre les mosaïques est considérablement plus élevé que le seuil de 0,2 pixels proposé par Townshend et al. (1992) ou celle de 0,5 pixels suggérée par Lunetta et Elvidge (1998) pour des études de détection du changement. Ils se concentrent toutefois sur d'analyses pixel basé d'images de grossière à moyenne résolution. Des classifications objet basé sont souvent mieux adaptées pour l'imagerie à haute résolution

(Stow et al., 2008 ; Cleve et al., 2008). On trouve des études empiriques sur les erreurs de positionnement dans des analyses de détection du changement des classifications objet basé (Wang et Ellis, 2005). Ces études donnent des RMSE de 4,4 à 6,2 m (Wang et Ellis, 2005) ou de 2,5 à 3,5 m (Carmel et al., 2006), mais recommandent d'utiliser des agrégations spatiales pour réduire l'impact de l'erreur de positionnement.

En dehors du cadre de la présente étude, des techniques de classification objet basé, s'appuyant sur la documentation (Kressler et al., 2005 ; Cleve et al., 2008), sont testées sur ces mosaïques RVB pour des analyses de détection du changement.

4.4.4 Possibilités d'application

PTGui peut créer des mosaïques de 300.000 pixels de large et de haut, ce qui semble illimitée comparée aux 27.000 x 38.000 pixels de la mosaïque de 2007 et les 15.000 x 41.000 pixels de la mosaïque de 2009. Les limites se trouvent toutefois dans la taille gérable du fichier géoréférencé TIFF : la mosaïque de 188 km² de 2007 avec sa résolution de 0,8 m pèse 1.7 Go et la mosaïque de 60 km² de 2009 avec sa résolution 0,4 m pèse 2,2 Go. Un fichier TIFF peut avoir une taille maximale de 4 Go. Selon la résolution souhaitée, cette méthode peut être facilement appliquée sur n'importe quelle région de taille moyenne pouvant atteindre 400 km². Cependant sur des terrains plus accidentés un MNT est nécessaire pour l'ortho-rectification.

On trouve de nombreux exemples sur l'assemblage et le géoréférencement des photos aériennes à petite échelle (ex. CartoTalk, 2012 ; PRLog, 2009). Plus rares et plus originaux sont des procédures opérationnelles de bout en bout y compris une évaluation des résultats comme celle-ci.

4.5 Conclusions

Face à l'intensification incontrôlée de l'utilisation des terres pour l'agriculture irriguée, les usagers de l'eau du bassin versant du Kou étaient à la recherche d'un outil simple qui les aiderait à évaluer l'ampleur du problème et à surveiller l'utilisation des ressources en eau. Le manque de fonds nécessaires

et le personnel possédant les qualifications requises ont été des facteurs contraignants.

Parmi l'imagerie géo-spatiale disponible, allant des données satellitaires à haute et très haute résolution couramment utilisées, aux photographies aériennes commerciales, le mosaïquage de photographies aériennes à petite échelle offre la meilleure solution. Des cartes d'images ont été créées à partir de centaines d'images aériennes amateurs (0,8 m à 0,4 m de résolution) à l'aide d'un outil de photographie panoramique et un logiciel SIG. Les seuls coûts étaient ceux relatifs à la location de l'avion, les honoraires de l'analyste et l'acquisition d'une image panchromatique SPOT archivée, qui est utile pour le géoréférencement d'autres photos à venir.

L'utilisation de l'interprétation de photographies aériennes a été critiquée comme étant coûteuse, laborieuse et subjective, mais de nouvelles approches peuvent et doivent être explorées, étant donné les grands progrès dans le traitement de données (Morgan et al., 2010). Cette étude conclut que les images amateur peuvent être prétraitées afin d'évaluer des occupations de sol de manière rapide et moins coûteuse, en tenant compte des ressources techniques et financières localement disponibles afin de garantir l'autonomie et la durabilité.

5 **Expérience d'un partenariat public-privé dans la gestion d'un périmètre irrigué à l'aide d'outils d'aide à la décision⁴**

Dans le cadre de la politique nationale d'autosuffisance alimentaire lancée à la fin des années 1960, un périmètre rizicole irrigué couvrant 1.200 ha, la « Vallée du Kou », a été aménagé par l'Etat au Sud-Ouest du Burkina Faso. Cogéré pendant une longue période par des fonctionnaires de l'Etat et une série d'organismes internationaux de développement, toute aide a été brusquement interrompue en 1993 ; abandonnant à leur sort, les agriculteurs et leur Association d'Usagers de l'Eau (AUE), mise en place dans la précipitation et par conséquence mal préparée pour assumer la gestion du périmètre.

Soucieuse de la mauvaise gestion de l'eau et consciente du manque d'expertise en matière de gestion en son sein, l'AUE s'est tournée vers un opérateur privé pour une aide à travers un partenariat public-privé (PPP), impliquant une externalisation de la gestion de l'eau. Initialement, le PPP a bénéficié de l'appui financier et technique d'un organisme international de développement. Les coûts sont maintenant progressivement supportés par l'AUE et représenteront finalement 12 % des redevances d'eau payées par les membres de l'AUE. Un conseiller en irrigation a été affecté à temps plein et des études techniques ont été réalisées pour évaluer les problèmes liés à la gestion de l'eau et recommander des solutions viables en ayant recours aux outils d'aide à la décision (SIMIS et SIG).

À divers stades, des réunions participatives ont été organisées pour permettre aux agriculteurs d'exprimer leurs points de vue, de proposer et d'échanger sur des solutions possibles. Après 3 ans, on a noté une certaine amélioration dans l'occupation des terres et la distribution de l'eau est plus équitable dans certaines parties, comme en témoignent les divers indicateurs

⁴ Adapté de: Wellens, J., Nitchou, M., Traoré, F., Tychon, B., 2013. A public-private partnership experience in the management of an irrigation scheme using decision-support tools in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 116, 1-11.

de performance et les résultats d'un recensement qualitatif. Cependant, les changements dans la gestion de l'eau ne peuvent pas seuls contribuer à la réalisation des objectifs sans des améliorations infrastructurelles nécessaires.

Comme les membres de l'AUE n'avaient pas un niveau d'éducation requis, le transfert effectif des connaissances n'était pas possible et l'aide apportée dans la gestion de l'eau est susceptible de rester dans les mains des opérateurs privés ou de l'Etat. Les agriculteurs ont toutefois exprimé leur satisfaction de l'approche proposée et leur volonté de participer à la gestion du périmètre dans le cadre d'un PPP.

5.1 Introduction

Dans le cadre de la politique nationale d'autosuffisance alimentaire qui remonte à la fin des années 1960, un périmètre rizicole irrigué couvrant 1.200 ha, appelé « Vallée du Kou », a été aménagé par l'Etat au Sud-Ouest du Burkina Faso. Géré conjointement par des agents de l'Etat et divers organismes internationaux de développement pendant une longue période, l'exploitation du périmètre a été satisfaisante dans l'ensemble.

La réalisation du périmètre a débuté en 1969, d'abord par Taiwan et après par la Chine, et a connu un mode de gestion plutôt colonial jusqu'en 1979. Par la suite, plusieurs phases bénéficiant d'une assistance technique néerlandaise ont suivi et pris fin en 1993. C'est à cette époque que l'Association d'Usagers de l'Eau (AUE) a été mise en place pour gérer le périmètre à travers une coopérative. La fin de l'assistance technique, combinée avec les Programmes d'Ajustement Structurel (PAS) décidés par la Banque Mondiale et le FMI, a favorisé la privatisation et a forcé un transfert brusque de la gestion du périmètre à la nouvelle et inexpérimentée AUE.

Comme dans beaucoup de cas où des initiatives inspirées d'en haut sont prématurément abandonnées (Subramanian et al., 1997; Meinzen Dick et al., 2002; Nkhoma et al., 2004), les perspectives pour l'AUE n'étaient pas bonnes. Les travaux d'entretien se faisaient rares, les rendements commençaient à enregistrer une baisse et une intensification d'utilisateurs d'eau en amont rendait plus difficiles les efforts visant à satisfaire les besoins en eau, incitant ainsi de nombreux agriculteurs à abandonner leurs parcelles.

Soucieuse de la mauvaise gestion de l'eau et consciente du manque d'expertise en matière de gestion en son sein, l'AUE s'est tournée vers un opérateur privé, « l'Association Eau Développement et Environnement » (AEDE) pour une aide. S'inspirant de son expérience dans le secteur de l'eau et de l'assainissement en milieu rural (Valfrey et Diallo, 2004), l'AEDE a entrepris une série d'actions.

Un conseiller en irrigation a été affecté à plein temps au niveau du périmètre. Sa présence a aidé les agriculteurs à reprendre confiance aux perspectives qu'offre le périmètre et a permis une évaluation plus technique des problèmes rencontrés, sur la base d'études et de témoignages des paysans. Plus tard, d'autres études plus techniques ont été menées pour évaluer les problèmes liés à l'eau et proposer des solutions durables, à savoir : une cartographie du périmètre, une base de données, une meilleure utilisation des terres, une évaluation de la distribution de l'eau à travers un ensemble d'indicateurs de performance, et l'adaptation du logiciel SIMIS de la FAO (Mateos et al., 2002) pour concevoir des tours d'eau plus efficaces et plus équitables.

L'approche accordait une priorité à la mise en place progressive de la structure de gestion, par opposition à une mise en place immédiate. Au départ, de 2006 à 2010, « l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger » (APEFE) et « Wallonie-Bruxelles International » (WBI) ont financé les activités de l'AEDE et apporté leur assistance technique. Par la suite, un contrat a été conclu, prévoyant la négociation des coûts de gestion de l'eau du périmètre irrigué entre les parties prenantes (AUE, agents de l'Etat et AEDE) et la reprise progressive par l'AUE. Une fois le processus achevé en 2013, ce partenariat public-privé (PPP) coûterait à l'AUE 12 % du montant réel des redevances d'eau annuelles collectées auprès des usagers. Compte tenu du fait que le taux de recouvrement des redevances dépassait rarement 60 % (Dembele et al., 2011), l'AEDE prévoit d'accompagner l'AUE dans la sensibilisation et la contribution des agriculteurs.

Le présent document décrit la mise en œuvre progressive, participative et réussie d'un PPP, basé sur le modèle « externalisation par le biais de contrats de prestations de services ou de la gestion » (Banque Mondiale, 2007). Depuis le transfert des infrastructures d'irrigation et de drainage à l'AUE, les services

d'approvisionnement en eau ont été bien gérés, bien que des difficultés dans la distribution de l'eau aient été relevées. Le présent document présente tout d'abord un diagnostic des pratiques d'irrigation *ex-ante* et leur efficacité, et aborde ensuite l'utilisation des outils d'aide à la décision dans l'optique d'une amélioration de l'utilisation des terres et de la distribution de l'eau, s'inspirant des rencontres participatives. Il conclut par une évaluation de la situation *ex-post* et le rôle modifié des divers intervenants.

5.2 Matériels et méthodes

5.2.1 Description de la zone d'étude

La Vallée du Kou (11°23' N ; 4°25' O) est située en zone subhumide (Wellens et Compaoré, 2003). La pluviométrie annuelle varie entre 600 et 1.200 mm, avec des précipitations plus marquées dans la période allant de juin à octobre. L'évapotranspiration de référence atteint 1.700 mm par an et varie de modérée, 4 mm/jour (août – décembre), à forte, 7 mm/jour en mars. On distingue les groupes de sols suivants : argileux, limoneux, argileux-limoneux, sablo-argileux, argileux-sablonneux et sablo-limoneux (Projet Vallée du Kou (1986), cité par Wellens et al., 2007). Le riz paddy est la culture principale, suivie par le maïs. On observe deux saisons distinctes de cultures sur la plaine : la culture pluviale, en période humide de juillet à octobre, et les cultures irriguées en saison sèche de janvier à juin. Dans la mesure où on n'enregistre pas de pénurie d'eau au cours de la saison des pluies, l'étude se focalise sur la saison de cultures irriguées, période où les demandes en eau sont maximales et les pénuries en eau deviennent presque chroniques.

Le périmètre irrigué est approvisionné à partir d'une prise d'eau située en amont. Pendant la saison sèche, la rivière Kou est détournée dans son intégralité vers le périmètre. La rivière retrouve un débit continu uniquement en saison des pluies. Au moment de l'aménagement du périmètre, la notion de débit écologique n'était pas d'actualité, et aucun des usagers de l'eau n'occupait les terres situées en aval de l'ouvrage. De la prise d'eau, l'eau est gravitairement amenée par un canal de 11 kilomètres vers le périmètre, à un taux de 3,5 m³/s en saison des pluies et une moyenne de 1,4 m³/s pendant la

saison sèche. Plus tard, un réseau de canalisations hiérarchiques distribue l'eau sur les 1.200 ha du périmètre. Un canal primaire borde le périmètre et redistribue l'eau le long de huit canaux secondaires (dénommé « blocs »), et ensuite le long des canaux tertiaires. La taille moyenne d'une parcelle est de 1 ha. L'irrigation est intermittente : un jour, l'eau est répartie parmi les quatre premiers blocs, et le lendemain, les quatre autres blocs en aval sont servis. On enregistre une augmentation considérable de la consommation d'eau chez les utilisateurs d'eau en amont; certains d'entre eux, appelés « pirates » ou « informels », provoquent parfois des pertes en eau atteignant 25 % et ont évidemment un effet négatif sur l'efficacité du périmètre. Cela entraîne des frictions entre les utilisateurs en amont et en aval, du fait que beaucoup parmi ces derniers font souvent face à des pénuries d'eau. Cette situation a par ailleurs incité à l'abandon de près d'un quart des champs et contribué à une baisse des rendements (IWACO-BERA, 1988 ; IWACO/BURGÉAP, 1998 ; Wellens et al., 2007, 2009).

5.2.2 Indicateurs de performance

Parmi les indicateurs comparatifs définis dans le cadre de l'évaluation de la performance de l'AUE et des systèmes d'irrigation, présentés par l'International Water Management Institute (IWMI; répertoriés dans Uysal et Atiş, 2010), ceux proposés par Molden et Gates (1990) sont largement utilisés (Jahromi et Feyen, 2001 ; Unal et al., 2004 ; Vandersypen et al., 2006 ; Kazbekov et al., 2009). Dans le cadre de la présente étude, les performances ont été évaluées à l'aide de leurs indicateurs d'adéquation (P_A), d'efficacité (P_F), de fiabilité (P_D) et d'équité (P_E). Les indicateurs comparent le volume d'eau nécessaire (Q_R) avec l'eau distribuée (Q_D) dans une sous-région donnée (R , les blocs tertiaires et secondaires échantillonnés) pendant une certaine période (T , la période de février-avril). CV est le coefficient de variation.

L'*adéquation* (P_A) met l'accent sur le souhait de fournir la quantité d'eau nécessaire dans la zone desservie :

$$P_A = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R p_A \right) \quad \text{avec } p_A = Q_D / Q_R \quad (5.1)$$

si $Q_D \leq Q_R$ sinon $p_A = 1$

où Q_D est l'eau distribuée ; Q_R est l'eau requise ; T est la période d'étude ; et R est la zone d'étude.

L'*efficacité* de l'approvisionnement en eau (P_F) illustre le désir de conserver l'eau en faisant correspondre l'offre d'approvisionnement aux besoins en eau:

$$P_F = \frac{1}{T} \sum_T \left(\frac{1}{R} \sum_R p_F \right) \quad \text{avec } p_F = Q_R / Q_D \quad (5.2)$$

si $Q_R \leq Q_D$ sinon $p_F = 1$

où Q_D est l'eau distribuée ; Q_R est l'eau demandée ; T est la période d'étude ; et R est la zone d'étude.

L'indicateur du degré de *fiabilité* (P_D) du système d'approvisionnement en eau est le degré de variabilité temporelle du ratio des quantités atteintes dans une région:

$$P_D = \frac{1}{R} \sum_R CV_T \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (5.3)$$

où Q_D est la quantité d'eau distribuée ; et Q_R est la quantité d'eau nécessaire ; T la période d'étude ; et R est la zone d'étude.

Si l'*équité* (P_E) est interprétée comme l'uniformité spatiale de la quantité relative d'eau fournie, alors une mesure appropriée de la performance par rapport à l'équité serait la variabilité spatiale moyenne du rapport entre la quantité livrée et la quantité requise au cours de la période concernée :

$$P_E = \frac{1}{T} \sum_T CV_R \left(\frac{Q_D}{Q_R} \right) \quad (5.4)$$

où Q_D est la quantité d'eau distribuée ; Q_R est la quantité d'eau nécessaire ; T est la période d'étude ; et R est la zone d'étude.

Étant donné que la fiabilité et l'équité sont exprimées par un CV , plus la valeur est faible, plus le degré de fiabilité et d'équité est élevé.

Pour permettre une meilleure visualisation dans la durée et une comparaison des efficacités et adéquations des différents blocs, les indicateurs *apport relatif en eau (ARE)*; (Levine, 1982) et *apport relatif en eau cumulé (AREC)*; (Sakthivadivel et al., 1993; Dembele et al., 2011) ont été aussi calculés. L'*ARE* peut être définie tel que présenté ici ; l'*AREC* est le total de ces *ARE* au fil du temps :

$$ARE = \frac{I_r + P_{ef}}{ET + P} \quad (5.5)$$

où I_r est l'apport en eau d'irrigation (mm) ; P_{ef} , la pluviométrie efficace (mm) ; ET , l'évapotranspiration de la culture (mm) ; et P , infiltration et percolation (mm).

Un indicateur de performance physique a été proposé par Vermillion (2000). Avec « terres irriguées » se référant à la partie des terres effectivement irriguées et « terres irrigables » correspondant à la zone potentiellement irrigable du périmètre, le taux d'utilisation de terres irriguées (*RI*) est :

$$RI = \text{terres irriguées} / \text{terres irrigables} \quad (5.6)$$

Par ailleurs, Nelson (2011) a proposé l'évaluation des performances à travers des enquêtes de satisfaction auprès des irrigants. Combiné avec les indicateurs ci-dessus, cet ensemble d'outils pourrait être utilisé pour améliorer presque n'importe quel système d'irrigation (Nelson, 2011).

Tous ces indicateurs ont été calculés pour la période précédant la gestion PPP (2006) et comparés à ceux sous gestion PPP (2009 et 2010). Les enquêtes n'ont été effectuées qu'à la fin de la période d'étude (2011).

5.2.3 Outil d'aide à la décision

L'analyse des occupations de parcelles sur le périmètre et des indicateurs de performance (voir plus loin) a clairement démontré la nécessité d'un outil d'aide à la décision pour réussir une répartition plus équitable de l'eau. De nombreux modèles d'outils d'aide à la décision pour la gestion de l'eau ont été répertoriés par Lozano et Mateos (2008). Ils montrent que SIMIS demeure un

outil utile pour la gestion des périmètres irrigués, surtout quand la rotation fixe est utilisée pour obtenir de l'équité pendant les périodes de demande maximale en eau, même quand la distribution de l'eau n'est pas adéquate. SIMIS est le système d'aide à la décision conçu par la FAO pour la gestion des périmètres irrigués (Sargardoy, 2001 ; Mateos et al., 2002).

Lozano et Mateos (2008) notent que le module de gestion de l'eau sous SIMIS porte sur quatre aspects ; besoins en eau des cultures, planification de l'irrigation saisonnière, calendrier d'approvisionnement en eau et contrôle de la consommation en eau. Le sous-module « besoins en eau des cultures » adopte l'approche de la FAO (Doorenbos et Pruitt, 1977 ; Smith, 1992). Il détermine les calendriers d'irrigation optimaux pour toutes les combinaisons possibles de dates de semis et les besoins quotidiens en eau des cultures individuelles, des parcelles ou des branches du réseau. Dans le sous-module « irrigation », les besoins nets en irrigation tout au long de la saison peuvent être calculés pour différentes occupations de parcelles et de cultures avec des dates de semis échelonnées et dès lors que l'efficacité de la distribution est prise en compte, les résultats peuvent être comparés avec la capacité du système et les allocations d'eau. Le sous module « calendrier d'irrigation » peut traiter trois principaux modes d'approvisionnement en eau : approvisionnement par rotation fixe, offre proportionnelle et semi-proportionnelle.

Pour le périmètre irrigué de la vallée du Kou, SIMIS, couplé à un SIG externe et un tableur, a servi à élaborer des tours d'eau pour optimiser l'utilisation des terres et assurer une répartition équitable de l'eau entre les blocs. Dans une deuxième phase (pas dans le cadre de cette étude), les calendriers d'irrigation et la distribution de l'eau jusqu'au niveau des parcelles ont été également étudiés sous SIMIS (Wellens et al., 2009 ; Wellens, 2011).

5.2.4 Prise de décision concertée

Des nouvelles approches de gestion combinent la dimension technologique avec la dimension sociale, basées sur la participation des parties prenantes. Les outils d'aide à la décision deviennent la plate-forme commune à travers laquelle s'organise le débat et s'intègrent diverses sources de connaissances (Giordano et al., 2007). L'espoir demeure que l'implication des acteurs les

amène à accepter et soutenir ces décisions (Raiffa et al., 2007). Lorsque les intervenants ne sont pas impliqués, le résultat de la procédure de décision pourrait être controversé et les solutions proposées pourraient faire face à une forte opposition, rendant ces solutions irréalisables (Kersten et Concilio, 2002).

Il existe une corrélation significative entre la perception des problèmes et la participation des agriculteurs dans la gestion de l'irrigation, comme l'ont souligné Khalkheili et Zamani (2009), qui ont relevé dans leur étude que les agriculteurs qui percevaient les problèmes avaient participé plus activement à la gestion de l'irrigation. La présente étude a également révélé une relation significative entre la participation des agriculteurs à la gestion de l'irrigation et le niveau de confiance entre les agriculteurs participant à la gestion du périmètre irrigué.

Becu et al. (2008) ont constaté que les acteurs n'éprouvent pas nécessairement des difficultés de compréhension face à un modèle informatique ou d'autres outils d'aide à la décision. Ils ont exploré le potentiel d'une approche de modélisation participative dans laquelle les intervenants participaient directement au fonctionnement du modèle, interprétant des résultats de simulation et suggérant des scénarios.

Pour le périmètre irrigué de la vallée du Kou, une équipe de recherche multidisciplinaire a été mise en place, composée d'un conseiller en irrigation, les ingénieurs agricoles de l'AEDE et des agents de l'Etat, avec l'assistance technique de l'APEFE-WBI. Le conseiller en irrigation travaille à plein temps. Son principal rôle est entre autres : (i) gagner la confiance des paysans en apportant des solutions pragmatiques aux problèmes quotidiens liés à l'eau, (ii) instruire les agriculteurs sur les causes de ces problèmes et les moyens techniques et structurels pour y pallier, et (iii) établir une relation de confiance entre les agriculteurs, les agents de l'Etat et les équipes d'ingénieurs responsables des outils d'aide à la décision. Les ingénieurs se concentrent sur les aspects plus techniques afin d'évaluer les problèmes liés à l'utilisation de l'eau et établir des calendriers d'irrigation accordant la priorité à l'équité.

Dès le départ, les représentants de l'AUE ont été invités à des sessions de travail sur SIMIS. Cela leur a donné une vision plus claire et une meilleure compréhension de la façon dont les différents scénarios de gestion étaient

conçus. L'équipe de l'AEDE s'est imprégnée des réalités sur le terrain à prendre en compte dans la conception des scénarios. En raison de la complexité de SIMIS, le partenaire privé est actuellement le principal opérateur, bien que les agents de l'Etat aient bénéficié d'une formation sur son fonctionnement.

Tout au long des différentes phases d'étude et d'application, plusieurs réunions participatives ont été organisées, avec la participation de tous les acteurs concernés ou leurs représentants. Ces sessions participatives ont servi à (i) promouvoir une vision partagée de la répartition de l'eau et des options de gestion, (ii) soutenir la négociation et la prise de décision collective et (iii) obtenir la validation par les parties prenantes des résultats.

5.2.5 Données

Les données agro-météorologiques proviennent de la station de recherche agricole, gérée par l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) et située au centre du périmètre. Différentes études nationales et internationales ont fourni les paramètres de cultures (Dembele, 1991 ; Allen et al., 1998). Les données SIG ont été numérisées grâce à une photographie aérienne et les agents de l'Etat sur le terrain ont apporté leur contribution dans la désignation des canaux et des parcelles. Les données provenant d'une ancienne carte pédologique élaborée par « le Projet Vallée du Kou » en 1986 ont également été intégrées (aucune référence disponible).

Avec l'installation du conseiller en irrigation en 2006, une campagne intensive de relevé des débits a été réalisée tout au long de la saison agricole sur plus de la moitié du périmètre irrigué (blocs 1, 2, 4 et 7), incluant le niveau tertiaire. Parallèlement, des échelles hydrométriques ont été établies à l'entrée de chaque canal secondaire et les courbes de jaugeage calculées. Depuis 2006, les relevés de débit ont été effectués tous les jours à l'entrée des blocs.

Depuis 2006, les données relatives à l'occupation des sols pendant chaque saison d'irrigation ont été enregistrées par le conseiller en irrigation et ajoutées à la base de données SIG.

En 2011, une enquête d'évaluation du PPP a été réalisée à l'aide d'un questionnaire semi-normalisé rempli au cours de 198 entretiens individuels

sur une population totale de 1.291 exploitants. La méthodologie utilisée a suivi celle décrite par Adrien et al. (2001). Cette évaluation devait permettre de mieux comprendre la perception des agriculteurs sur les changements proposés et de déterminer le niveau de satisfaction par rapport aux services d'approvisionnement en eau avant et après la mise en œuvre du PPP. Comme dans Khalkheili et Zamani (2009), la satisfaction des agriculteurs a été mesurée en utilisant une échelle de trois niveaux d'attitude de « Type Likert ».

5.3 Résultats et discussion

5.3.1 Evaluation pré-PPP

Le périmètre irrigué se caractérise par des types de sols très hétérogènes, allant de sols sablonneux à sols argileux (Figure 5.1). Environ 44 % des sols sont de texture légère et donc moins adaptés pour la culture du riz paddy en raison du degré élevé de pertes par percolation. La combinaison de ces données pédologiques avec la carte d'occupation des parcelles pour la saison d'irrigation de 2006 (Figure 5.2) a montré que les zones sablonneuses en amont du périmètre étaient cultivées en riz, tandis que les zones argileuses en aval, mieux adaptées pour la culture du riz paddy, avaient été abandonnées par manque d'eau.

Sur la base de ces résultats, un changement dans l'utilisation des terres a été proposé (Figure 5.3). Deux objectifs étaient visés : (i) éviter d'affecter les sols à texture légère à la culture du riz paddy afin d'économiser l'eau, et (ii) utiliser l'eau économisée pour étendre les zones irriguées en aval. Alors, pour éviter une ambition démesurée, la culture du maïs, qui nécessite moins d'eau, a été proposée sur les parcelles nouvellement acquises. Des parcelles abandonnées depuis longtemps (présence de sols rocaillieux, topographie pauvre, inaccessibilité aux canaux, etc.) ont été identifiées sur une série temporelle de cartes d'occupation. Après discussion avec l'AUE, il a été décidé de ne pas les ré-inclure dans le nouveau schéma.

Les indicateurs de performance calculés pour 2006 sont présentés au Tableau 5.1. L'évaluation a été réalisée au niveau du périmètre et à l'intérieur de plusieurs blocs. Pour l'évaluation au niveau du périmètre, les entrées de

quatre des huit blocs ont été surveillées quotidiennement. Pour l'évaluation des pratiques de gestion à l'intérieur des blocs, les débits provenant des canaux tertiaires ont été mesurés de façon ponctuelle pendant toute la saison. Parce qu'elles étaient fondées sur des mesures de débits différentes (entrées secondaires et tertiaires), différentes valeurs des indicateurs ont été notées au niveau du périmètre et au niveau des blocs.

La plupart des indicateurs montrent que les pratiques de gestion au niveau des blocs étaient plus mauvaises que la distribution de l'eau entre les blocs. L'adéquation a été « moins faible » pour le bloc 1, en raison de sa position en amont et donc une plus grande disponibilité de l'eau. L'indicateur d'efficacité l'a confirmé. L'efficacité était faible pour le bloc 1 à cause des pertes d'eau et une irrigation excessive; elle était bonne à très bonne pour les autres blocs. Quand l'eau devient rare et l'offre répond presque à la demande, l'efficacité est toujours élevée. Malheureusement, aucune donnée de rendement n'a été prélevée dans le temps afin d'explorer davantage l'impact de ces tendances. La fiabilité et l'équité ont été faibles pour tous les blocs étudiés, notamment dans les blocs situés plus en aval. Lorsqu'il y avait moins d'eau disponible à l'entrée d'un bloc, il était plus difficile d'assurer une répartition égale et aussi plus difficile de fournir la quantité d'eau désirée à temps (fiabilité).

Les résultats *ARE* et *AREC* pour 2006 sont indiqués dans les Figures 5.4 et 5.5. Les valeurs *ARE* montrent quelques variations au fil du temps. En dehors du bloc 1, toutes les valeurs étaient souvent inférieures à la valeur critique *ARE* ($ARE = 1$), ce qui signifie que les quantités d'eau livrées ne satisfaisaient pas la demande. Parfois, une période antérieure d'irrigation excessive compense une période ultérieure de sous-irrigation. Par conséquent, l'*AREC* a été également calculé en supplément des graphiques de courbes *ARE* (Dembele et al., 2011). Le graphique *AREC* a confirmé qu'il y avait beaucoup d'irrigations excessives pour le bloc 1 et des déficits chroniques pour tous les autres blocs. Les différences entre les blocs sont clairement montrées dans les figures, allant d'un *AREC* final de 2,9 pour le bloc 3 à 9,1 pour le bloc 6.

L'évaluation pré-PPP a révélé que beaucoup restait à faire en vue de l'amélioration dans l'occupation des parcelles et la distribution de l'eau. L'outil d'aide à la décision SIMIS a été utilisé pour l'élaboration d'une politique de répartition équitable de l'eau.



Figure 5.1 – Carte pédologique.



Figure 5.2 – Utilisation des parcelles pendant la saison d'irrigation en 2006.



Figure 5.3 – Occupations des parcelles proposées.

Tableau 5.1 – Résumé des indicateurs de performance ; avec des mesures de débit des canaux tertiaires comme base pour les indicateurs au niveau des blocs (en haut à gauche) et des mesures de débit des canaux secondaires pour l’analyse au niveau du périmètre (en haut à droite), et la légende d’interprétation (en bas).

	Niveau des blocs (2006)				Niveau du périmètre		
	1	2	4	7	2006	2009	2010
Adéquation, P_A	0.65	0.59	0.44	0.53	0.67	0.75	0.72
Efficacité, P_F	0.73	0.98	0.90	0.91	0.88	0.80	0.81
Fiabilité, P_D	0.38	0.43	0.59	0.72	0.29	0.28	0.30
Équité, P_E	0.37	0.37	0.40	0.61	0.46	0.34	0.34
Taux des terres irriguées, RI					0.80	0.83	0.81
Débit moyen, Q_m (l/s)					1429	1419	1313
Légende							
Adéquation, P_A	Pauvre	< 0.8	< Passable	< 0.9	< Bonne		
Efficacité, P_F	Pauvre	< 0.7	< Passable	< 0.85	< Bonne		
Fiabilité, P_D	Pauvre	> 0.2	> Passable	> 0.1	> Bonne		
Équité, P_E	Pauvre	> 0.25	> Passable	> 0.1	> Bonne		

Où P_A : adéquation (quantité livrée par rapport à la quantité requise); P_F : efficacité (quantité nécessaire par rapport à la quantité livrée); P_D : dépendance (homogénéité temporelle de la quantité relative livrée); P_E : équité (uniformité spatiale de la quantité relative livrée) ; RI : taux d'utilisation des terres irriguées et Q_m : débit moyen disponible au niveau du périmètre.

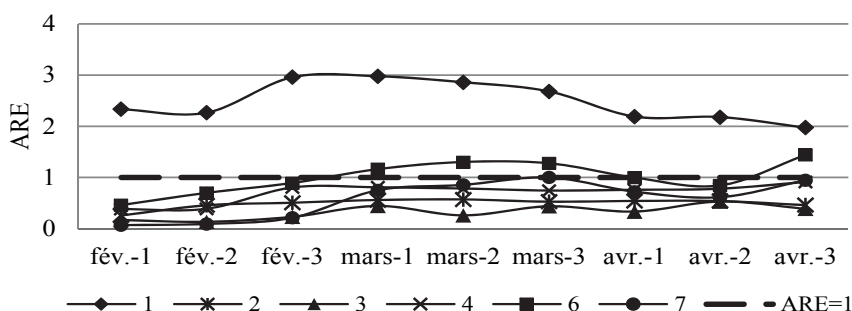


Figure 5.4 – Evolution de l'ARE pour les blocs en 2006.

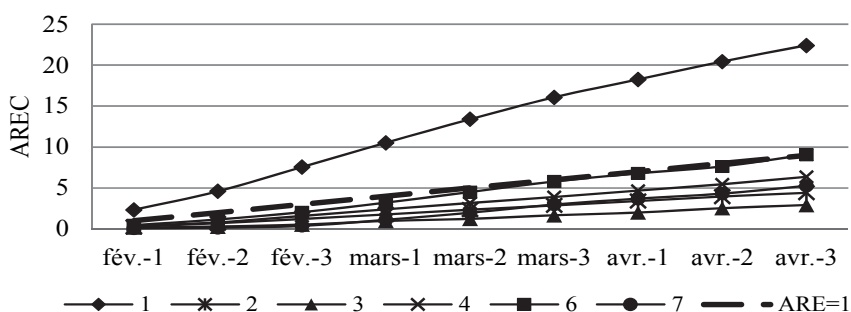


Figure 5.5 – Evolution de l'AREC pour les blocs en 2006.

5.3.2 Activités d'appropriation

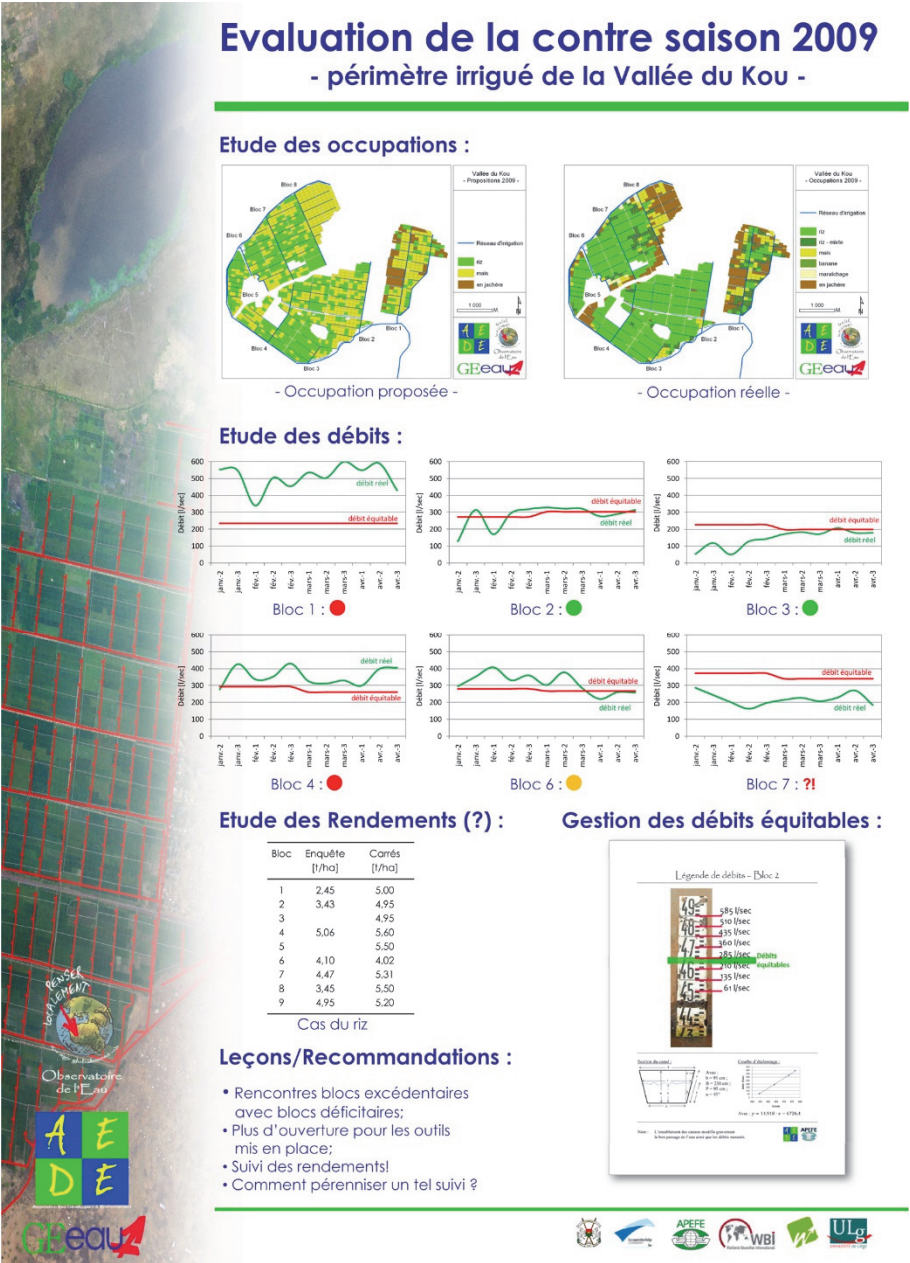
Avant de proposer un nouveau schéma d'aménagement et des projets de calendriers d'irrigation plus équitables sous SIMIS, plusieurs réunions participatives ont été organisées. L'organisation de la plupart d'entre elles a été facilitée par le conseiller en irrigation assisté par la cellule d'ingénieurs. Les représentants de l'AUE et les agents de l'Etat étaient toujours présents. Les résultats de l'évaluation ont été examinés et le logiciel SIMIS a été présenté comme un outil susceptible d'aider à la prise de décisions dans l'optique d'une amélioration de la gestion du périmètre irrigué.

Peu de temps après ces réunions et les séances de sensibilisation du public, plusieurs séances de travail ont été organisées pour discuter et présenter les différents scénarios de gestion de l'eau. Compte tenu des caractéristiques variés des sols (sols sablonneux filtrant ou très argileux) et des deux cultures

les plus pratiquées dans la région, le riz paddy et le maïs, quatre scénarios de gestion ont été présentés : (i) optimiser l'utilisation des terres en prenant en compte les différents types de sols (maïs sur sol sablonneux et riz uniquement sur des sols argileux) ; (ii) laisser en jachère certains secteurs ; (iii) appliquer une rotation systématique des cultures (riz cette année et maïs la prochaine année) ; et (iv) une version plus flexible du premier scénario, permettant la culture de plus de riz paddy, mais dans une approche d'irrigation déficitaire (Geerts et Raes, 2009). A tout moment, les agriculteurs étaient encouragés à exprimer leurs opinions et les divers scénarios ont été finalisés en conséquence, jusqu'à l'adoption finale par l'AUE du « scénario d'irrigation déficitaire ».

A la fin de la première saison d'irrigation gérée conjointement (2009), une évaluation a été réalisée. Ont fait l'objet de présentation sous forme d'affiche (Figure 5.6) à l'attention de l'AUE : les occupations de parcelle proposées par rapport à l'utilisation réelle ; les débits proposés par rapport aux débits observés à la tête des différents blocs. Après une évaluation générale de la dernière saison d'irrigation, les agriculteurs ont évoqué les difficultés qu'ils avaient rencontrée et des recommandations ont été faites pour la prochaine année d'irrigation : (i) des « légendes pour les débits » ont été rédigées (Figure 2.3) et placées à l'entrée de chaque bloc (Figure 2.4), donnant aux agriculteurs une idée de l'eau consommée par les différents blocs et encourageant le contrôle sous la pression des pairs (Aggarwal, 2000), comme le débit recommandé pour chaque bloc y figurait aussi ; (ii) un suivi des rendements a été proposée afin d'avoir une idée de l'impact économique du scénario « irrigation déficitaire » ; et (iii) les agriculteurs, heureux que davantage de parcelles aient été cultivées (voir ci-dessous et la Figure 5.7), ont convenu d'un nouveau cycle d'irrigation déficitaire en 2010.

Le travail en 2010 a été basé sur la consolidation des acquis de 2009. Les « légendes pour les débits » semblent avoir eu un impact majeur sur la réglementation de l'eau. L'agriculteur était maintenant en mesure de surveiller l'utilisation de l'eau du périmètre en termes de quantité d'eau qu'il recevait et celle reçue par le voisin. Le mauvais comportement de l'aiguadier a été facilement (et souvent) remarqué par les agriculteurs et l'AUE en prenait note.



5.3.3 Evaluation PPP

En plus d'acquiescer l'approbation et la satisfaction des agriculteurs par rapport à l'approche actuelle de gestion (confirmée ci-dessous), une évaluation du PPP a été réalisée. L'occupation des parcelles a été étudiée pour les saisons d'irrigation 2009 et 2010. Les débits à l'entrée de chaque bloc ont été suivis quotidiennement tout au long de ces saisons, et une enquête a été réalisée pour évaluer la satisfaction des agriculteurs par rapport au PPP.

L'occupation des parcelles proposée n'était pas vraiment respectée comme souhaité (Figures 5.7 et 5.8). D'autres terres en aval ont été emblavées, mais il était difficile de convaincre les agriculteurs sur la plupart des parcelles sablonneuses en amont de changer leur utilisation des terres. Cependant, on a commencé à cultiver plus de maïs sur les sols sablonneux du bloc 1. Le Tableau 5.1 montre que lorsque la quantité d'eau diminuait (Q_m est passé de 1.429 l/s à 1.313 l/s), la surface irriguée est restée stable (RI de 0,80 à 0,81). Elle a même augmenté au cours de la campagne de 2009, qui a été moins touchée par la pénurie d'eau.

Les indicateurs de performance pour 2009 et 2010 sont comparés à ceux de 2006 au Tableau 5.1. Les résultats *ARE* et *AREC* pour 2009 et 2010 sont présentés dans les Figures 5.9 à 5.12. A ce stade de la gestion assistée de l'eau, les calendriers d'irrigation proposés n'incluaient pas les canaux tertiaires. Les indicateurs concernaient uniquement le niveau du périmètre irrigué (canaux secondaires) et pas l'intérieur des blocs. Pour les calculs d'*ARE* et *AREC*, seuls les débits à l'entrée des blocs (canaux secondaires) étaient nécessaires, permettant une comparaison entre les blocs.

Pour trois des quatre indicateurs, on a enregistré une certaine amélioration. Aucun des indicateurs n'a sensiblement changé par rapport à l'évaluation pré-PPP, mais dans une localité où l'eau devient rapidement rare, au moins une continuation du déclin de la gestion de l'eau a été évitée. L'adéquation est restée faible, mais il fallait s'y attendre dans un système d'irrigation déficitaire. L'efficacité est passée de « bon » à « passable », surtout parce que l'aiguadier a eu des problèmes pour maintenir les quantités allouées. La fiabilité est restée stable, ce qui peut être considéré comme positif suite à la diminution d'eau. L'équité s'est améliorée, ce qui indique que les agriculteurs ont tenu compte



Figure 5.7 – Occupation des parcelles en saison d’irrigation 2009.



Figure 5.8 – Occupation des parcelles en saison d’irrigation 2010.

de la nécessité d'une répartition plus équitable de l'eau. Des améliorations sont encore nécessaires dans les années à venir.

Les graphiques *ARE* et *AREC* ont confirmé les tendances ci-dessus. Pour ces deux années, les courbes des graphiques *ARE* étaient plus prononcées que celles de 2006, confirmant que les changements ne sont pas fiables. L'irrigation excessive était de loin plus évidente en 2009 (blocs 1 et 6), expliquant la baisse de l'efficacité. Les graphiques *AREC* montrent cette irrigation excessive, mais illustrent une répartition plus équitable de l'eau en 2010. La gamme des valeurs *AREC* pour les blocs à la fin de la saison s'est réduite. Cependant, comme l'indiquent les écarts du sommet à la base dans l'approvisionnement en eau dans les résultats *ARE* et *AREC*, l'approvisionnement en eau du bloc 1 vers l'aval était difficile. La pénurie d'eau chronique a touché tous les blocs sauf le premier.

En 2010, le rendement de riz était en moyenne de 4,3 tonnes/ha sur un échantillon de 215 champs et le rendement de maïs était en moyenne de 2,3 tonnes/ha sur un échantillon de 48 champs (Nitchou et al., 2010). Même dans le cas de l'irrigation déficitaire, les rendements de riz étaient plus élevés que les 3,8 tonnes/ha rapportés dans des études antérieures (Ouedraogo, 1993 ; Lahcen, 2000). Aucune donnée précise pour la période pré-PPP n'était disponible.

Afin d'évaluer la satisfaction des agriculteurs par rapport au fonctionnement du PPP, quatre questions fondamentales ont été présentées à une tranche substantielle de la population agricole dans la vallée de Kou (198 sur 1.291 propriétaires de parcelle) : (1) étaient-ils satisfaits du PPP? (2) leur situation hydro-agricole s'était-elle améliorée? (3) étaient-ils satisfaits des informations reçues et des conseils? ; et (4) souhaitaient-ils continuer avec le PPP? Les résultats sont donnés au Tableau 5.2. La réaction dans l'ensemble est très positive, dépassant 90 % dans la plupart des cas. Les quelques remarques négatives sont venues principalement du bloc 2, le deuxième canal secondaire en amont. Cette partie du périmètre était connue pour sa surconsommation de l'eau d'irrigation et devait fournir le plus d'efforts pour économiser l'eau conformément aux nouvelles règles de distribution

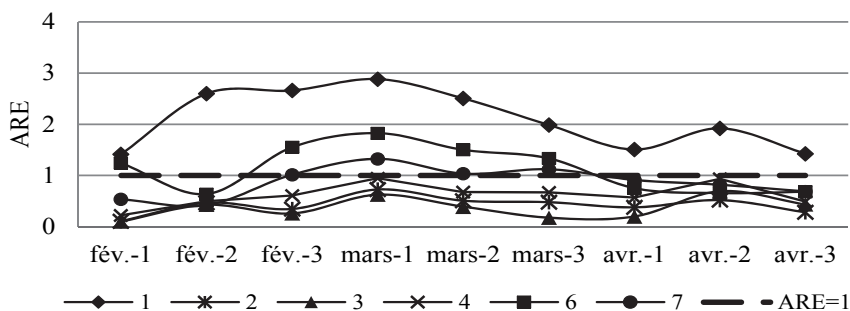


Figure 5.9 – Evolution de l'ARE pour les blocs en 2009.

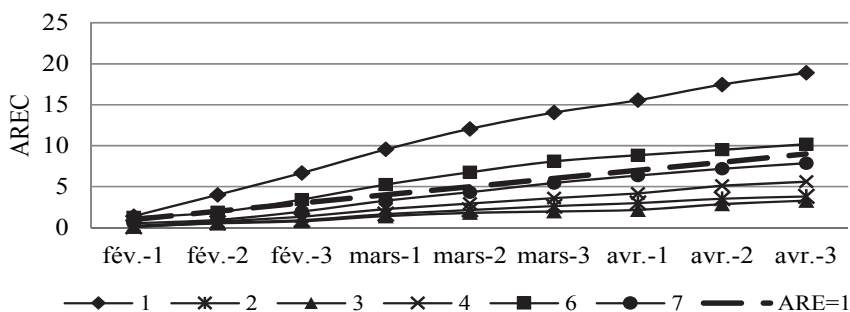


Figure 5.10 – Evolution de l'AREC pour les blocs en 2009.

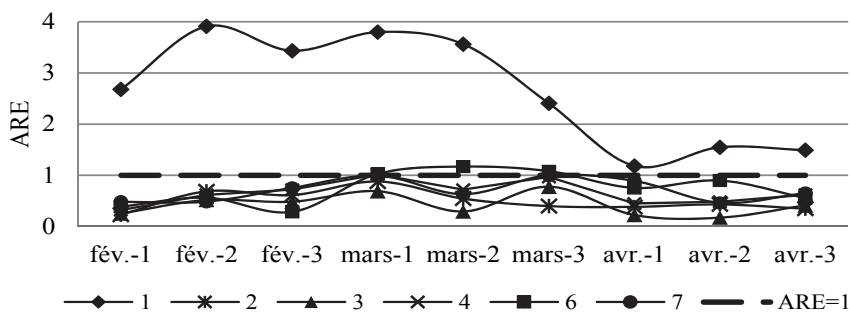


Figure 5.11 – Evolution de l'ARE pour les blocs en 2010.

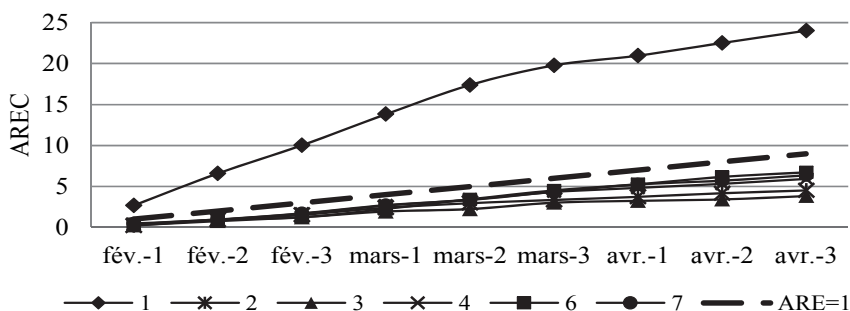


Figure 5.12 – Evolution de l'AREC pour les blocs en 2010.

Tableau 5.2 – Résumé des résultats de l'enquête. En pourcentages: (a) satisfaction par rapport au PPP ; (b) amélioration de la situation hydro-agricole ; (c) satisfaction par rapport aux avis et conseils ; et (d) favorable à la poursuite du PPP.

Répondants	(a)			(b)			(c)			(d)		
	Oui	Non	Neutre	Oui	Non	Neutre	Oui	Non	Neutre	Oui	Non	Neutre
Périmètre	198	95	3	2	87	8	5	97	1	2	97	1
Bloc 1	25	96	0	4	72	4	24	96	0	4	96	0
Bloc 2	46	93	4	2	70	24	7	93	2	4	96	2
Bloc 3	18	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0
Bloc 4	37	86	8	5	89	8	3	95	3	3	95	0
Bloc 5	15	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0
Bloc 6	26	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0
Bloc 7	19	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0
Bloc 8	12	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0

Tableau 5.3 – Remarques par ordre de priorité faites par les agriculteurs sur le PPP (en %). (Seulement 3 observations reçues pour le bloc 6.)

	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4	Bloc 5	Bloc 6	Bloc 7	Bloc 8	Périmètre
Nombre des répondants	15	28	16	18	13	3	9	9	111
Amélioration de la gestion de l'eau	17	11	46	11	31	33	29	23	24
Amélioration financière		3	31	26	23		33	54	21
Révision des calendriers d'irrigation	33	31		26					14
Bons conseils et avis	6	6		26	19	33	19	23	13
Persévérance des pénuries d'eau		31		5		33			8
Contrôle des utilisateurs en amont	33	7							7
Présence du conseiller			23			19			6
Renforcement de l'appui					23				4
Paix sociale	11	3		5	4				3

Au cours de l'enquête, les agriculteurs ont été invités à exprimer leurs opinions et de faire des commentaires. Tous les agriculteurs ne se sont pas exprimés, ce qui explique pourquoi le nombre de répondants est plus faible que celui enregistré au cours de la première partie de l'enquête (111 sur 1.291 propriétaires de terrain). Le Tableau 5.3 tente de classer les observations. Au niveau du périmètre, 21 % ont souligné qu'ils avaient noté une amélioration de leurs moyens de subsistance en raison de la meilleure distribution de l'eau, mais aucun ne donne le niveau d'amélioration. Environ 14 % souhaitaient que les calendriers d'irrigation soient révisés ; il s'agissait principalement des utilisateurs en amont, qui éprouvaient des difficultés à s'en sortir avec la plus faible quantité d'eau qu'ils recevaient. Les utilisateurs se trouvant plus en aval, disposant de plus d'eau grâce au programme de distribution d'eau équitable, ont déclaré avoir enregistré de meilleures récoltes.

5.4 Conclusions

On note des progrès dans la gestion du périmètre irrigué de la Vallée du Kou. Les agriculteurs sont mieux sensibilisés sur tous les aspects du périmètre et souhaitent que les sessions d'information et de sensibilisation soient organisées jusqu'au niveau des communautés de base. Ils aimeraient aussi que le conseiller en irrigation et l'équipe d'ingénierie continuent à les aider dans la mise en œuvre des scénarios de gestion. Comme les résultats varient d'une année à l'autre, il est difficile de dire dans quelle mesure l'approche PPP a effectivement contribué à une meilleure gestion de l'eau ; certes, la distribution de l'eau est plus équitable, mais les indicateurs de performance montrent également des pertes sur tout le périmètre irrigué. Avec un périmètre irrigué exploité de longue date et connaissant une dégradation, comme celui de la Vallée du Kou, une meilleure gestion de l'eau seule comporte des limites et doit être accompagnée d'améliorations infrastructurelles nécessaires. Malheureusement, aucun financement n'est disponible pour ce type d'intervention. Néanmoins, les tendances sont encourageantes, avec 21 % des propriétaires de parcelles disant qu'ils connaissent de meilleures conditions de vie.

Le goulot d'étranglement le plus important dans l'amélioration de la gestion de l'eau reste le caractère non-officiel entre les usagers de l'eau et l'aiguadier. Actuellement, il n'existe pas de règles ou de sanctions qui les lient collectivement. Ceux qui n'ont pas un esprit d'appartenance à une coopérative peuvent toujours se comporter comme ils veulent. La complexité du logiciel SIMIS est un autre obstacle. Comme la plupart des membres de l'AUE n'ont pas les connaissances techniques et les compétences nécessaires, il sera difficile de leur transférer le savoir-faire en matière de gestion de l'eau (y compris SIMIS). Le périmètre est donc susceptible de rester sous gestion privée ou étatique, mais les agriculteurs semblent satisfaits de la démarche et des résultats, et ils sont prêts à continuer à participer à cette gestion PPP du périmètre.

Il est également intéressant de noter comment les parties prenantes se sont volontiers repositionnées, chacune dans son domaine de compétence. Le conseiller en irrigation et l'équipe d'ingénierie se concentrent sur leurs activités d'informations et de conseils aux membres de l'AUE à travers des sessions d'information, fournissant des données objectives de terrain qui permettent d'orienter les débats et aident à l'adoption de plans de gestion de l'eau. Les agents de l'état jouent un rôle d'accompagnateur, étant les mieux placés pour imposer des règles et des sanctions. Comme relevé d'une manière plus générale par Subramanian et al. (1997), l'AUE, grâce à la prise de décision participative et l'évolution positive dans la gestion du périmètre, dispose actuellement d'un capital social plus important, qui augure le succès futur de l'exploitation du périmètre.

Cette approche a également été adoptée par un projet financé par l'USAID Millenium Challenge Account dans un autre périmètre irrigué anciennement géré par l'état au Burkina Faso, celui de la Vallée du Sourou. En réponse à une demande du ministère de l'Agriculture du Burkina Faso, l'APEFE-WBI explore les moyens d'introduire cette approche à deux autres régions, Mogtado et Karfiguela. Dans tous ces cas, tant que les paysans ne sont pas disposés à contribuer aux frais de l'aide extérieure, ces coûts devront être supportés par les structures soutenant le périmètre.

6 **Evaluation de la performance du modèle AquaCrop pour le cas du chou sur des petites parcelles irriguées en milieu semi-aride⁵**

Les initiatives pour la promotion de la petite irrigation sont en pleine expansion au Burkina Faso. Toutefois, dans de nombreux cas, les rendements optimaux ne sont pas obtenus malgré la disponibilité de l'eau et les applications recommandées de nutriments. Les acteurs locaux ont besoin d'un outil d'aide à la décision, facile à utiliser pour évaluer l'utilisation de l'eau d'irrigation et son impact sur les rendements. La présente étude s'intéresse à un modèle eau-sol-plante, AquaCrop, développé par la FAO, adapté pour la production du chou (*Brassica oleracea L.*), et utilisant un ensemble de données limitées et une validation croisée non intégrale (LOOCV ; *leave-one-out cross-validation*). L'expérience a été réalisée au Sud-ouest du Burkina Faso sur de petites parcelles irriguées, où des conditions optimales de gestion n'étaient pas forcément assurées. Les indicateurs statistiques – l'erreur type normalisée (*nRMSE*) et l'indice d'ajustement (*d*) – suggèrent que le modèle est très fiable pour la simulation de la biomasse du chou et la teneur en eau des sols (faible *nRMSE* et indice-*d* proche de 1). La relation entre le rendement observé et le rendement simulé a donné un indice-*d* de 0,99 et un *nRMSE* de 1,39 % (soit 0,59 tonnes/ha). La comparaison entre la teneur en eau des sols observée et modélisée a donné un indice-*d* de 0.90 et un *nRMSE* de 4,38 % (soit 9,13 mm). Il est aussi intéressant de souligner le lien indirect entre la densité de semis et le rendement par l'intermédiaire de la couverture maximale de la canopée, ce qui peut considérablement simplifier l'estimation du rendement. Il a été retenu qu'AquaCrop est un outil très utile, permettant aux utilisateurs sur le terrain, d'évaluer et d'optimiser l'utilisation de l'eau d'irrigation et le rendement de chou.

⁵ Adapté de Wellens, J., Raes, D., Traore, F., Denis, A., Djaby, B., Tychon, B., 2013. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 127, 40-47.

6.1. Introduction

Au Burkina Faso, l'agriculture emploie plus de 85 % de la population, contribue à environ 33 % du PIB et génère plus de 85 % des recettes d'exportation (Zoungrana et Kabore, 2009). Compte tenu de sa situation, pays subsaharien semi-aride, l'irrigation s'y présente comme une grande alternative à une agriculture pluviale aléatoire et bénéficie d'une série de mesures incitatives du gouvernement. L'agriculture irriguée génère également le plus grand profit parce que les produits arrivent sur le marché lorsque les produits cultivés en saison des pluies ne sont plus disponibles, d'où une forte demande et des prix élevés. Les initiatives visant à promouvoir la petite irrigation sont en pleine expansion, ce qui nécessite une surveillance accrue des pratiques d'irrigation (Traoré, 2012 ; Traoré et al., 2013 ; Wellens et al, 2013b, 2013d). Plus précisément, les rendements de chou sur des petites parcelles irriguées au Sud-ouest du Burkina Faso sont bien en deçà des niveaux nationaux et internationaux. Des rendements d'environ 40 tonnes/ha sont enregistrés, loin des rendements irrigués potentiels estimés entre 50 et 85 tonnes/ha (Doorenbos et Kassam, 1979 ; MAE, 1985 ; Tiwari et al., 2003).

Les acteurs locaux ont donc besoin d'un outil pratique d'aide à la décision pour les aider à évaluer les pratiques d'irrigation et les rendements qui en résultent. Les modèles de simulation offrent un moyen peu coûteux d'étudier un large éventail d'options de gestion. La FAO a conçu AquaCrop, un modèle de simulation eau-sol-plante pour servir d'outil d'aide à la prise de décisions dans la planification et l'analyse (Steduto et al., 2009 ; Hsiao et al., 2009). Le modèle simule la variation de la biomasse atteignable en réaction aux variations de l'humidité du sol. Bien que s'inspirant de processus biophysiques de base et complexes, AquaCrop utilise un nombre relativement faible de paramètres à adapter en fonction des situations et des cultures. Des variables d'entrée intuitives par défaut, qui peuvent être déterminés à l'aide de méthodes simples (Raes et al., 2009 ; Steduto et al., 2009), sont suffisantes et ne nécessitent pas d'ajustements supplémentaires.

Abedinpour et al. (2012) et Stritevic et al. (2011) donnent un aperçu de la capacité d'AquaCrop à utiliser un minimum de données d'entrée comparativement aux modèles sophistiqués de croissance de culture, souvent

spécifiques pour certaines variétés. Le modèle a été testé avec succès pour l'orge en Afrique subsaharienne (Araya et al., 2010a), le blé en Iran (Andarzian et al., 2011) et dans l'Ouest canadien (Mkhabela et Bullock, 2012), le teff en Éthiopie (Araya et al., 2010 b), le quinoa en Bolivie (Geerts et al., 2009) et le maïs en Californie (Hsiao et al., 2009). L'objectif de cette étude était d'adapter et de tester la capacité du modèle AquaCrop pour simuler les rendements de chou (*Brassica oleracea* L.) et la teneur en eau du sol (couche de 0 à 60 cm), et donc d'évaluer l'efficacité du calendrier d'irrigation de petites parcelles irriguées de production du chou au Sud-ouest du Burkina Faso.

6.2. Matériels et méthodes

6.2.1. Expériences de parcelle

Au Sud-ouest du Burkina Faso, spécifiquement dans la plaine alluviale du bassin versant du Kou (11°18' N ; 4°26' O ; 300 m au-dessus du niveau de la mer), des petites parcelles irriguées de chou ont fait l'objet des suivis intensifs de 2008 à 2010.

La variété de chou la plus couramment cultivée au Burkina Faso est l'hybride « KK Cross ». Après 2-3 semaines en pépinière, les jeunes plantes sont transplantées au début de février et récoltées environ 97 jours plus tard au début du mois de mai. Toutes les parcelles jouxtent une rivière pérenne à partir de laquelle l'eau est pompée pour l'irrigation par bassin ou à la raie. Pour cette étude, l'hypothèse formulée est qu'il n'existe aucun stress de fertilité et que les doses locales recommandées de nutriments ont été appliquées, soit 30-40 tonnes/ha de fumier organique, 600 kg/ha de NPK et 125 kg/ha d'urée (PNUD, 2007). Toutes les parcelles ont été régulièrement, mais pas constamment, désherbées.

Sur un ensemble initial de 10 parcelles suivies par l'étude, seulement 6 ont pu être retenues. Les 4 autres parcelles ont subi des pertes considérables causées par des maladies ou des ravageurs ; une situation difficile à maîtriser lorsqu'on travaille sur des parcelles de paysans.

6.2.2. Présentation du modèle

Le modèle eau-sol-plante AquaCrop suppose une relation linéaire entre le taux de croissance de la biomasse et la transpiration grâce à un paramètre de productivité de l'eau (WP). Pour un intervalle de temps donné, la biomasse accumulée est la résultante de la WP et de la transpiration accumulée de la canopée (de Wit, 1958 ; Hsiao et Bradford, 1983 ; Steduto et al., 2007). Cette WP est un paramètre spécifique, normalisée pour l'évaporation et la concentration atmosphérique de CO_2 afin de permettre l'application d'AquaCrop dans divers climats et endroits. Le modèle n'inclut pas les processus hiérarchiques sous-jacents simulant les étapes intermédiaires conduisant à l'accumulation de la biomasse. En conséquence, la structure du modèle est simple avec peu de paramètres d'entrée (Steduto et al., 2009). Le modèle utilise la couverture de la canopée, plus facile à obtenir au lieu de l'indice foliaire (LAI), comme base de calcul de la transpiration.

AquaCrop différencie les paramètres conservateurs (fixes) et les paramètres non-conservateurs (cas spécifiques). Les paramètres conservateurs ne changent pas avec la situation géographique, les pratiques de gestion ou en fonction du temps et doivent être déterminés dans des conditions favorables et non-limitantes ; ils restent applicables aux conditions de stress via la modulation de leurs fonctions de réponse au stress (Steduto et al., 2009 ; Raes et al., 2009). Les paramètres conservateurs comprennent : la croissance et la diminution de la couverture de la canopée ; le coefficient de culture pour la transpiration de la couverture maximale de la canopée ; la WP pour la biomasse ; et les seuils d'épuisement hydrique du sol. Ces paramètres sont censés être applicables à un large éventail de conditions et ne sont pas spécifiques à une variété de culture donnée (Steduto et al., 2012).

Certains paramètres de culture sont non-conservateurs (ex. la densité des plantes, le temps à la maturité). D'autres paramètres non-conservateurs sont affectés par les conditions climatiques, la gestion de la parcelle ou les conditions du sol. Ils ne peuvent pas être appliqués sur une grande échelle et doivent être fournis par l'opérateur ; s'ils ne sont pas disponibles, ils peuvent être estimés par le modèle (Raes et al., 2009, 2011).

6.2.3. Données météorologiques et pédologiques

Les données météorologiques ont été collectées au niveau de l'aéroport international de Bobo-Dioulasso, situé à 15 km de la zone d'étude. Les températures maximales et minimales journalières, la vitesse du vent à 2 m au-dessus du sol, le rayonnement solaire et l'humidité relative moyenne ont été obtenus pour la période 2008-2010. L'évapotranspiration de référence (ET_0) a été calculée selon la méthode Penman-Monteith de la FAO (Allen et al., 1998) à l'aide de la calculatrice ET_0 (FAO, 2009). La saison de culture (de février à début mai) coïncide avec la saison sèche, durant laquelle les précipitations peuvent être négligées. Les moyennes mensuelles des températures minimales et maximales sont de 24,5 °C et 37,5 °C. L'évapotranspiration de référence journalière était de 7 mm/jour en janvier, atteignant 8,5 mm/jour en mars.

La carte nationale des sols et les profils de sol disponibles (Bunasols, 2002) définissent les sols de la région selon le type Gleyic Ferric Lixisols (FAO, 2001). Des analyses de texture du sol disponibles ont permis d'estimer les propriétés hydrauliques des sols à l'aide des fonctions de pédotransfert décrites par Saxton et al. (1986). La Figure 6.1 présente les propriétés hydrauliques des différents profils de sol disponibles pour la région étudiée. Les quantités d'eau totales disponibles (TAW : différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champ et au point de flétrissement) sont semblables pour tous les profils. AquaCrop simule le bilan hydrique du sol sous forme de pourcentage de TAW. Etant donné que les caractéristiques du sol étaient presque les mêmes dans la zone d'étude, il a été décidé de travailler avec le profil de sol HC-297, qui était plus proche de celui des champs suivis. Selon l'horizon du sol, la teneur en eau à saturation variait de 52 à 54 %, à la capacité au champ de 39 à 43 % et au point de flétrissement de 11 à 16 %. La densité apparente variait de 1,3 à 1,4 g/cm³ et la conductivité hydraulique à saturation était d'environ 1.200 mm/jour. La teneur en eau gravimétrique a été mesurée chaque semaine à trois profondeurs : 0,2 m, 0,4 m et 0,6 m. Ces mesures ont été répétées chaque fois trois fois par champ.

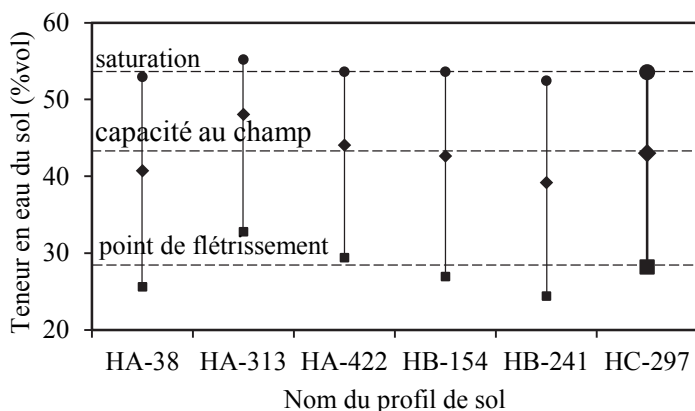


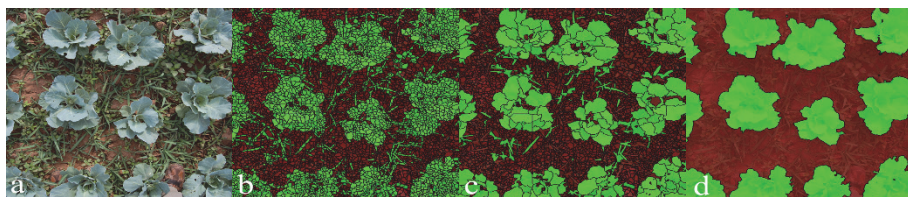
Figure 6.1 – Profils de sol disponibles pour la région et leurs propriétés hydrauliques, avec le profil HC-297 et les caractéristiques utilisées dans la présente étude. En haut (●) : teneur en eau à saturation ; au milieu (◆) : teneur en eau à la capacité au champ ; Et en bas (■) : teneur en eau au point de flétrissement.

Tableau 6.1 – Liste des champs utilisés pour la calibration et la validation d’AquaCrop pour le cas de choux.

Nr.	Année	Variété	Densité des plantes (plantes/m ²)	Date de semis	Date de récolte	Irrigation totale (mm)
1	2008	KK Cross	8.2	12/02/08	8/05/08	570
2	2008	KK Cross	9.5	12/02/08	8/05/08	490
3	2008	KK Cross	8.6	7/02/08	3/05/08	460
4	2008	KK Cross	6.1	6/02/08	2/05/08	490
5	2010	KK Cross	11.9	25/01/10	21/04/10	480
6	2010	KK Cross	6.7	2/02/10	29/04/10	470

6.2.4. Données de culture

Les dates de semis et de récolte ont été enregistrées. La couverture maximale de la canopée, la maturité et la sénescence ont été observées. On suppose que la sénescence est atteinte lorsque le couvert végétal commence à diminuer. Comme l’étude s’est focalisée sur les légumes-feuilles, les informations sur la floraison et la formation des grains n’étaient pas applicables (Raes et al., 2009). Le rendement était mesuré peu de temps après la sénescence sur la base de trois carrés de rendement d’une surface de 2 m x 2 m sur chaque parcelle. Toutes les données sont résumées au Tableau 6.1.

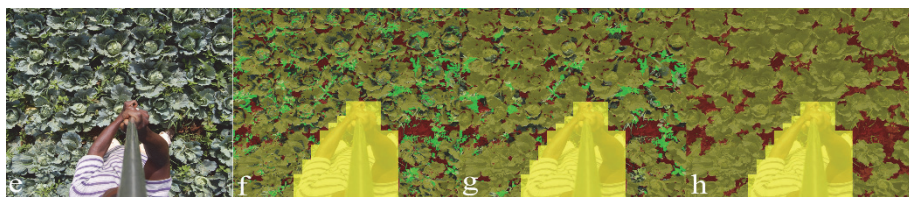


- a) centre de la photo de la couverture de la canopée
- b) - segmentation fine
 - si la teinte des bandes rouge, verte et bleue (RVB) est supérieure à 0,24 : le segment est classifié comme chou
 - tous les autres segments sont classés comme sol
- c) - segmentation plus grossière des segments classifiés comme chou
 - si la teinte des bandes RVB d'un segment de chou est inférieure à 0,31 : le segment de chou est reclassifié comme sol ; tous les autres segments sont classifiés comme sol
 - si un segment sol a déjà été classifié comme chou et sa bordure relative à un segment de chou est supérieure à 0,5 : le segment est reclassifié comme chou
- d) la couverture de la canopée est de 43,7%

Figure 6.2a – Exemples d'analyses objet-basé de la fraction de couverture de la canopée avec les commandes eCognition pour le stade phénologique initial

L'évolution de la fraction de la couverture de la canopée fut l'objet d'étude hebdomadaire en prenant de manière aléatoire sur chaque champ des dizaines de photos à 2 m au-dessus du couvert végétal (Hu et al., 2007). Un appareil Nikon D40, avec la longueur focale sur 18 mm, équipé d'une télécommande infrarouge, était monté sur une canne télescopique avec un niveau à bulle. Pour éviter des surestimations dues aux distorsions de parallaxe près des bords de l'image, seuls les centres des images ont été analysés.

La présence temporaire de mauvaises herbes, et la métamorphose de la texture et de la couleur des choux tout au long du cycle de croissance ont rendu plus difficile la récupération de données relatives à la fraction de la couverture de la canopée. Des analyses objet-basé ont été effectuées sous eCognition (Luscier et al., 2006). Deux étapes sont nécessaires : la segmentation des images et la classification des segments. La segmentation d'images regroupe des pixels adjacents et similaires d'une image en objets ou segments sur base d'échelle, de couleur et de forme. Le paramètre d'échelle définit le niveau d'hétérogénéité dans les segments, alors que les paramètres de couleur et de forme déterminent comment les pixels de l'image doivent être regroupés. Différentes procédures ont été développées pour les différents



- e) centre de la photo du couvert végétal
- f) - segmentation fine
 - si la teinte des bandes rouge, verte et verte (RVV) composées est 0,5 et la saturation des bandes RVB est inférieure à 0,3 ou la différence de texture est inférieure à 0,3 : le segment est classifié comme choux
 - si la teinte des bandes RVV est 0,5 et la saturation des bandes RGB est supérieure à 0,55 ou la différence de texture est supérieure à 0,8 : le segment est classifié comme mauvaises herbes
 - si la teinte des bandes RVV est 0 ou l'intensité des bandes RVB est inférieure à 0,11 : le segment est classifié comme sol
- g) - segmentation grossière des segments de choux
 - même classification qu'au niveau f
- h) - segmentation grossière des segments de mauvaises herbes
 - si le segment avait auparavant été classé comme choux, il est à nouveau classé comme choux
 - si le segment avait été auparavant classé comme sol, il est à nouveau classé comme sol
 - si la surface relative du segment actuel et le segment sous-jacent de choux de niveau f est supérieure à 0,1 : le segment est classé comme choux
 - si la surface relative du segment actuel et le segment sous-jacent de mauvaises herbes de niveau f est supérieure à 0,1 : le segment est classé comme mauvaises herbes
 - la couverture de la canopée est de 87,5%

Figure 6.2b – Exemples d'analyses objet-basé de la fraction de couverture de la canopée avec les commandes eCognition pour le stade phénologique de fin saison

stades phénologiques (Figures 6.2 a-b) (Wellens et Denis, 2012). Dans tous les cas, plusieurs niveaux d'objets-images ont été générés représentant différentes échelles. Les petits objets au niveau 1 présentaient des caractéristiques spectrales significatives ; le sol et les choux sont caractérisés par des différences de teinte et de saturation. Les caractéristiques de forme (i.e. taille) sont plus pertinentes pour les niveaux plus élevés ; si nécessaire combinées aux paramètres de couleur pour différencier les choux des mauvaises herbes. La hiérarchie et les dépendances locales ont été également abordées ; le logiciel eCognition non seulement crée les objets, mais construit

aussi une hiérarchie multi-résolution de ces objets. Si un certain nombre de sous-objets au niveau 1 sont classifiés comme choux, les classifications du niveau 1 peuvent être transférées à tous les autres niveaux. La canne télescopique et l'opérateur étaient masqués manuellement.

6.2.5. Calibration et validation du modèle

Lorsque les données disponibles sont insuffisantes pour constituer des sets séparés de données d'entraînement pour la calibration et la validation, la validation croisée est particulièrement utile. Dans un premier temps, les paramètres sont ajustés en utilisant l'ensemble des données (i.e. calibration). Ensuite, différents sous-sets de données sont utilisés pour la validation croisée. Enfin, les résultats de la simulation à l'aide de l'ensemble de données et des sous-sets de la validation croisée sont comparés pour évaluation. La forme la plus extrême de la validation croisée, connue sous le terme de validation croisée non intégrale (LOOCV ; *leave-one-out cross-validation*), a largement été étudiée en raison de sa simplicité mathématique (Cawley et Talbot, 2003). Comme son nom l'indique, la LOOCV implique l'utilisation d'une seule observation dans la validation et les observations restantes comme données d'entraînement. Pour chaque set de données d'entraînement, des jeux de paramètres sont calibrés et les meilleurs résultats appliqués dans la validation. Cela est répété jusqu'à ce que chaque observation au sein du set de données soit utilisée une fois pour la validation (Hastie et al., 2001).

La teneur en eau initiale au moment de la transplantation a été estimée à 80 % de la TAW. Les programmes d'irrigation observés ont été définis en spécifiant la date et la profondeur de chaque irrigation.

La calibration de la couverture de la canopée est cruciale (Andarzian et al., 2011). La couverture de la canopée à la transplantation était estimée à 7 cm² par plante. La couverture initiale de la canopée a été estimée par le modèle basé sur l'espacement des plants. La densité des plantes varie d'une parcelle à une autre. Il existait une relation linéaire entre la densité des plantes et la couverture maximale de la canopée (Figure 6.3). Les valeurs issues de cette fonction ont été utilisées pour l'estimation de la couverture maximale. Après la saisie de dates phénologiques critiques, telles que les dates de couverture

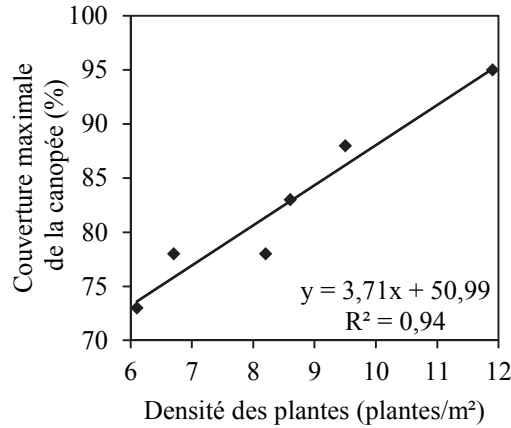


Figure 6.3 – Relation entre la densité des plantes et la couverture maximale de la canopée

maximale, d'émergence et de sénescence, l'expansion de la couverture de la canopée a été estimée automatiquement. Les principaux paramètres pour la calibration de la couverture de la canopée incluent le coefficient de croissance de la couverture de la canopée (CCG), le coefficient de déclin de la couverture de la canopée (CDC), les indices de stress et leurs formes de courbe affectant l'expansion foliaire et la sénescence précoce. Etant donné que les choux sont récoltés peu de temps après le début de la sénescence, une détermination précise de la CDC n'était pas cruciale. L'effet de la fertilité du sol n'a pas été évalué parce qu'une quantité suffisante de nutriments a été ajoutée dans les champs suivis.

Après la calibration de la couverture de la canopée, la *WP* et le seuil pour la fermeture des stomates ont été choisis en comparant les rendements finaux simulés et observés. Des données relatives à la biomasse tout au long de la saison de croissance n'étaient pas disponibles. Tous les paramètres adaptés, qui diffèrent des paramètres par défaut que le modèle utilise pour un légume-feuille, sont présentés au Tableau 6.2. Les paramètres, mesurés sur les parcelles, adaptés aux conditions tropicales ou à des fins de simulation, ou calibrés, sont différenciés.

Tableau 6.2 – Paramètres de culture adaptés utilisés dans AquaCrop pour la simulation de la productivité des choux.

Description	Value	Unités	Interprétation	Source
Température supérieure	40	°C	Au-dessus la croissance s'arrête	Adapté
Couverture initiale de la canopée du jeune plante à une émergence de 90% (CC ₀)	7	cm ²		Mesuré
Coefficient de croissance de canopée (CGC)	11.9	%	Croissance journalière	Calibré
Couverture maximale de la canopée (CC _x)	70-95	%	Dépend de la densité des plantes	Mesuré
Coefficient de déclin de la canopée (CDC)	10	%	Déclin journalier relatif à la CC _x	Mesuré
Productivité de l'eau (WP*)	15	gramme m ⁻²	Biomasse au-dessus du sol	Calibré
Indice de récolte de référence (HI ₀)	67	%	Pourcentage du cycle de croissance	Mesuré
Accroissement de l'indice de récolte	50	%		Adapté
Seuil supérieur pour l'expansion de la canopée	0.5	-	Au-dessus l'expansion est inhibée	Calibré
Seuil inférieur pour l'expansion de la canopée	0.8	-	L'expansion s'arrête	Calibré
Facteur de la forme du coefficient de stress pour l'expansion de la canopée	6	-	Fortement convexe	Calibré
Seuil supérieur pour la fermeture des stomates	0.5	-		Calibré
Facteur de la forme du coefficient de stress pour la fermeture des stomates	6	-	Fortement convexe	Calibré
Temps reprise après la transplantation	2	jours		Mesuré
Temps de transplantation à la profondeur maximale d'enracinement	35	jours		Mesuré
Temps de transplantation à la sénescence	75	jours		Mesuré
Temps de transplantation à la maturité	87	jours		Mesuré
Profondeur effective minimale d'enracinement	0.3	m		Adapté
Profondeur effective maximale d'enracinement	0.6	m		Mesuré

6.2.6. Evaluation du modèle

La teneur en eau du sol dans la zone racinaire, l'évolution de la couverture de la canopée et le rendement ont été pris en compte dans l'évaluation du modèle. Les valeurs de la teneur en eau du sol observées et simulées ont été comparées. En ce qui concerne l'évaluation de la LOOCV, les données observées par rapport aux données calibrées et les données observées par rapport aux données validées ont été comparées pour la couverture de la canopée et le rendement. La pertinence de ces comparaisons a été évaluée à l'aide de graphiques et de tests statistiques. Le coefficient de détermination (R^2), la régression linéaire, le $nRMSE$ et l'indice- d ont été utilisés dans l'évaluation du modèle.

Le $nRMSE$, comme décrit par Loague et Green (1991), donne une mesure (%) de la différence relative des données simulées par rapport aux données observées (EQ. 6.1).

$$nRMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{M} \quad (6.1)$$

Où n est le nombre d'observations, P_i et O_i représentent les valeurs simulées et observées, et M la moyenne des variables observées. La simulation est jugée excellente lorsque le $nRMSE$ est inférieur à 10%, bonne lorsqu'il est compris entre 10 % et 20 %, assez bien lorsqu'il est compris entre 20 % et 30 %, et faible lorsqu'il est supérieur à 30 % (Jamieson et al., 1991).

L'indice- d a été calculé à l'aide de l'équation de Willmott et al. (1985) (Eq. 6.2).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - M| + |O_i - M|)^2} \right] \quad (6.2)$$

Où n est le nombre d'observations, P_i l'observation prédite, O_i l'observation mesurée et M la moyenne des valeurs observées. Le plus l'indice se rapproche de 1, le mieux le paramètre étudié est simulé par le modèle.

Les résidus (différences entre les valeurs observées et prévues) ont été testés pour leur normalité. Un examen des résidus peut révéler si les

paramètres présumés sont raisonnables et le modèle approprié (NIST/SEMATECH, 2012).

6.3. Résultats et discussion

6.3.1. Résultats de calibrage et de validation

La Figure 6.4 présente deux exemples de teneurs en eau moyennes du sol observées et simulées. La comparaison graphique et les résultats statistiques montrent que la teneur en eau du sol a été modélisée de manière satisfaisante (pour tous les six champs le $nRMSE$ moyen était de 4,37 % et l'indice- d moyen était de 0,90). Les stress hydriques ont commencé à se produire vers la fin du stade de développement de la canopée. Dans la mesure où la canopée était presque complètement développée, ces stress ont probablement plutôt affecté la production de biomasse que l'expansion de la canopée.

AquaCrop était aussi capable de simuler avec précision le développement de la canopée. Les résultats de la LOOCV sont présentés dans les Figures 6.5 et 6.6. Les différences entre la calibration ($R^2 = 0,96$; $nRMSE = 11,37$ % et indice- $d = 0,99$) et la validation ($R^2 = 0,95$; $nRMSE = 13,25$ % et indice- $d = 0,99$) étaient minimes, confirmant la capacité de simulation du modèle. La Figure 6.7 donne deux exemples ; dans les deux cas la couverture de la canopée simulée est proche des valeurs observées du repiquage à la récolte.

Les résultats de la LOOCV de la biomasse finale au-dessus du sol étaient presque identiques (Figures 6.8 et 6.9). Toutes les valeurs étaient sur la première bissectrice du graphe de la régression linéaire, avec un R^2 de 0,98, un $nRMSE$ de 1,17 tonnes/ha et un indice- d de 0,99 pour la calibration et un R^2 de 0,98, un $nRMSE$ de 1,39 tonnes/ha et un indice- d de 0,99 pour la validation. Le modèle prédisait très bien le rendement final. Les graminées à racines peu profondes (5 cm à max. 10 cm) n'ont pas affecté le bilan hydrique du sol et n'ont en conséquence aucune incidence significative sur le rendement des choux.

Les résidus des données relatives aux couvertures observées et prévues, et aux rendements finaux observés et prévus, étaient tous normalement distribués.

6.3.2. Discussion

Carberry et al. (2004) relèvent que dans les pays en développement, des modèles de simulation s'efforcent de trouver une pertinence dans l'agriculture sur le terrain. Peu d'études existent où les pratiques agricoles ont bénéficié de la modélisation (Whitbread et al., 2010). Pour tenter de comprendre les différences de rendement entre les normes locales et nationales, des agents de vulgarisation, des agriculteurs et des chercheurs ont uni leurs efforts dans un suivi intensif des petites parcelles de choux irrigué.

Sur les 10 premières parcelles, 4 ont été perdues en raison des maladies et des ravageurs ; réduisant de manière drastique le set de données. Néanmoins, Deligios et al. (2013) ont adapté et évalué avec succès un modèle de culture semblable, Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) (Jones et al., 2003), portant sur le colza d'hiver à l'aide d'un set de données même légèrement plus petit. Le nombre limité de champs dans le cadre de la présente étude n'a cependant pas permis des procédures standards de calibration et de validation, à l'aide de différents sous-set de données ; une LOOCV a été utilisée en conséquence. En ce qui concerne la qualité des résultats, presque identiques pour la calibration et la validation, on peut conclure que dans ce cas l'absence de données n'a probablement pas affecté la qualité des paramètres de culture obtenus.

La relation entre la densité de semis et la couverture maximale de la canopée a produit des résultats intéressants. Les valeurs de la couverture maximale, dérivées des densités de plantes observées, ont été utilisées dans les simulations. Etant donné la qualité des rendements simulés, le rendement des choux pourrait également être estimé sur la base de la densité de semis. Une densité plus élevée donne une couverture maximale plus élevée et donc un rendement potentiel plus élevé (Tableau 6.3). Les méthodes d'irrigation à la raie et par bassin sont couramment utilisés pour irriguer les choux. La densité de semis est plus élevée dans des bassins que sur des raies (Tableau 6.3), ce qui entraîne par conséquent un rendement accru. Simon et al. (2010) ont confirmé que l'irrigation par bassin permet des rendements supérieurs de choux et même une meilleure efficacité dans l'utilisation de l'eau par rapport à l'irrigation à la raie.

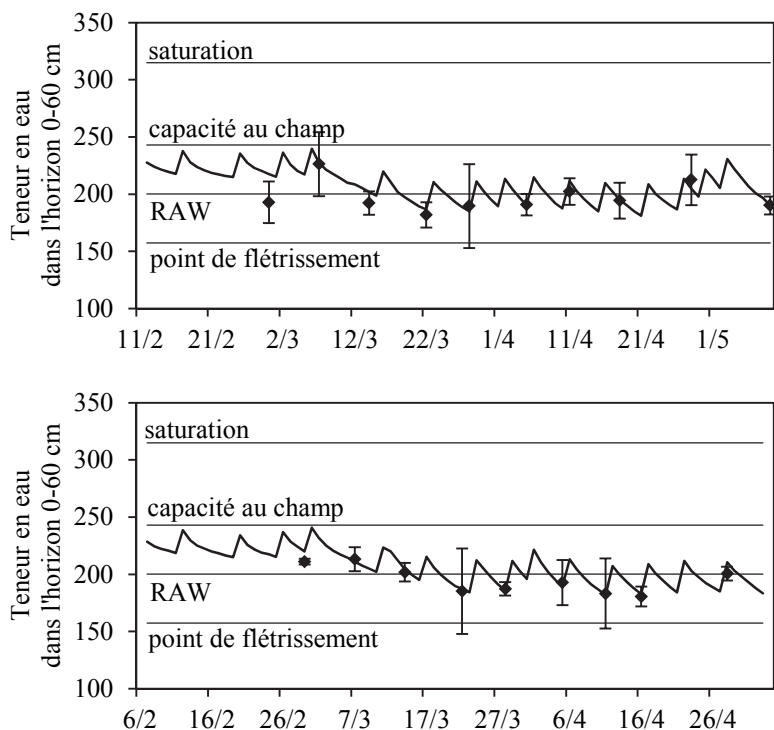


Figure 6.4 – Teneurs en eau du sol observées (points avec barres d'erreur) comparées aux teneurs en eau simulées (ligne) pour deux parcelles. Chaque point représente une moyenne de trois données et les barres verticales sont ± 1 écart-type.

En haut : Cas 2: $nRMSE = 5,0 \%$ et $d = 0,86$.

En bas : Cas 3: $nRMSE = 2,6 \%$ et $d = 0,96$.

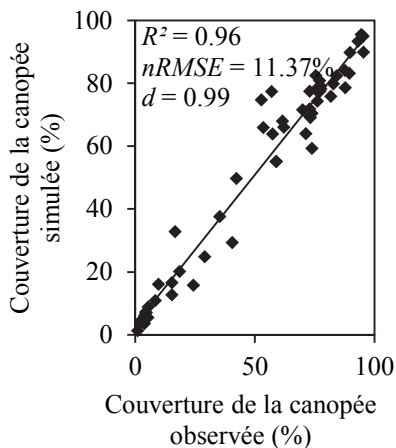


Figure 6.5 – Couvertures de la canopée observées et simulées en utilisant l'ensemble des données (calibration).

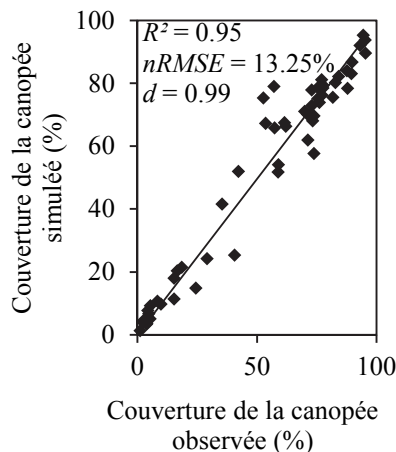


Figure 6.6 – Couvertures de la canopée observées et simulées en utilisant des sous-sets pour la LOOCV (validation).

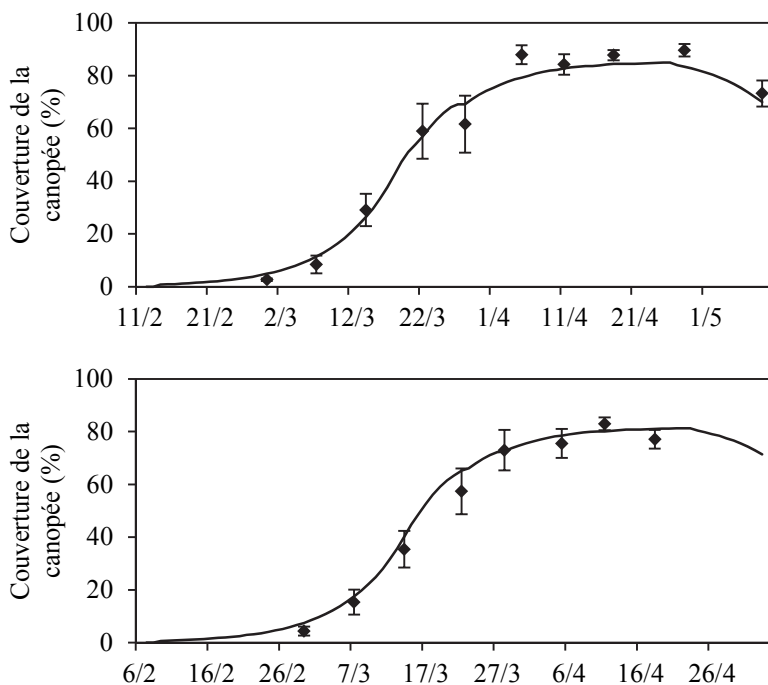


Figure 6.7 – Couvertures de la canopées observées (points avec barres d'erreur) par rapport aux couvertures simulées (ligne) pour deux parcelles. Chaque point représente une moyenne de 10-15 données et les barres verticales sont ± 1 écart-type.

En haut : Cas 2: $nRMSE = 8,5 \%$ et $d = 0,99$.

En bas : Cas 3: $nRMSE = 14,7 \%$ et $d = 0,98$.

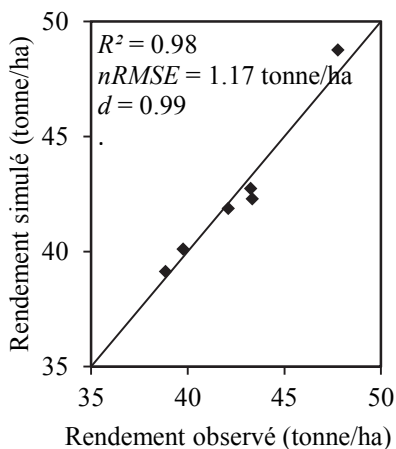


Figure 6.8 – Biomasses finales au-dessus du sol observées et simulées en utilisant l'ensemble des données (sur la première bissectrice) (calibration).

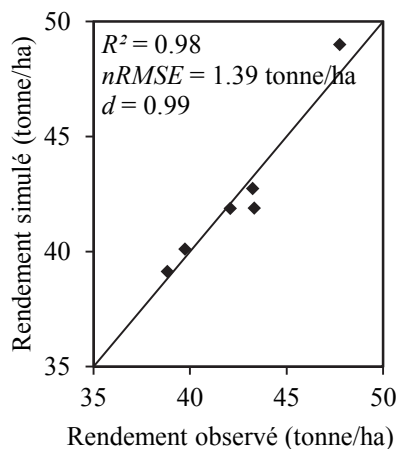


Figure 6.9 – Biomasses finales au-dessus du sol observées et simulées en utilisant des sous-sets pour la LOOCV (sur la première bissectrice) (validation).

Tableau 6.3-Rendements observés, simulés et potentiels de choux,
avec les écarts, les ratios et quelques variables d'entrée.

Nr.	Densité des plantes (plantes/m ²)	Type d'irrigation	Couverture maximale de la canopée (%)	Stress affectant l'expansion de la canopée (%)	Fermeture des stomates (%)
1	8.2	Raie	78	6	15
2	9.5	Bassin	88	9	18
3	8.6	Raie	83	9	20
4	6.1	Raie	73	1	13
5	11.9	Bassin	95	0	15
6	6.7	Raie	78	1	14

Nr.	Rendement observé (tonne/ha)	Rendement simulé (tonne/ha)	Ecart (%)	Rendement potentiel (tonne/ha)	Rapport rendement réel et potentiel (%)
1	42.08	41.88	0.00	52.74	79
2	43.25	42.74	-0.01	56.36	76
3	38.83	39.13	0.01	53.99	72
4	39.75	40.1	0.01	47.02	85
5	47.75	48.77	0.02	60.7	80
6	43.33	42.29	-0.02	49.59	85

Outre les variables d'entrée les plus importantes (densité de semis et couverture maximale), le Tableau 6.3 résume davantage les rendements observés et simulés, et quelques autres résultats d'AquaCrop comme le rendement potentiel et l'impact du stress hydrique sur le développement de couverture de la canopée et la fermeture des stomates. Les ratios de rendement réel et potentiel montrent des pertes de rendement importantes dues au stress. Ces résultats ont surpris les agents de vulgarisation et les agriculteurs. Aucun n'était conscient qu'il appliquait une irrigation déficitaire (Geerts et Raes, 2009), surtout que l'eau est relativement abondante grâce à la rivière pérenne. L'irrigation empirique, traditionnellement appliquée par les agriculteurs, a un effet négatif sur le rendement (Mermoud et al., 2005). De meilleurs calendriers d'irrigation doivent être élaborés afin d'augmenter le rendement. Dans le cas 2, par exemple, une augmentation de 5 à 10 % de l'irrigation pourrait augmenter la production et le revenu du paysan de 5 à 10 %, et réduire à un certain degré le fossé entre les rendements national et local.

Il est important de noter que les conditions non-optimales de l'expérimentation, le site unique d'expérimentation et la seule variété

considérée pour l'expérimentation, pourraient avoir compromis la calibration et la validation. Néanmoins, la collecte des données et la LOOCV ont été menées avec rigueur. AquaCrop a simulé d'une manière réaliste, et les résultats présentés sont une base solide pour d'autres études de simulation de choux.

6.4. Conclusion

La capacité du modèle AquaCrop pour simuler la teneur en eau du sol, la couverture de la canopée et le rendement de choux ont été évaluées pour des petites parcelles irriguées. Nonobstant les conditions non-optimales, causées par le set limité de données et le stress hydrique, les paramètres conservateurs requis ont été déterminés. Une procédure LOOCV a été réalisée et les résultats statistiques ont été jugés d'excellente qualité. Les fonctions de stress peuvent être revues au cas où le modèle doit être répliqué dans d'autres régions. Un autre élément d'intérêt a été le lien indirect entre la densité de semis et le rendement par l'intermédiaire de la couverture maximale de la canopée, ce qui pourrait simplifier considérablement l'estimation de rendement.

Les résultats ont attiré la curiosité des agents de vulgarisation. Des calendriers d'irrigation adaptés sont en train d'être élaborés afin d'offrir des meilleurs conseils aux paysans et optimiser leurs rendements. Un intérêt particulier est le fait que le modèle requiert un nombre relativement restreint de données d'entrées explicites et souvent intuitives. On peut conclure que le modèle AquaCrop est un outil très utile qui permettra aux agents de vulgarisation locaux d'évaluer la consommation d'eau et le rendement des choux.

7 Conclusion générale & perspectives

7.1 Conclusion générale

Le bassin versant du Kou a, pendant plusieurs décennies, été confronté à diverses formes de conflits liés à un large éventail de problèmes souvent rencontrés dans des régions irriguées. Les infrastructures hydro-agricoles du bassin versant couvrent une superficie totale de près de 2.000 ha. Elles comprennent des jardins privés et des zones horticoles, ainsi qu'un grand périmètre irrigué de riz de 1200 ha réalisé par l'Etat. Malgré une abondance d'eau en raison de plusieurs sources, un aquifère facilement exploitable et un cours d'eau pérenne, la plupart des utilisateurs de l'eau font régulièrement face à des pénuries d'eau en raison du nombre croissant d'utilisateurs et de pratiques d'irrigation inefficaces.

Les décideurs et les acteurs locaux ont donc besoin d'outils d'aide à la décision pour améliorer la surveillance et l'exploitation des ressources en eau de la région. Les technologies doivent être faciles à utiliser et accessibles à un faible coût, et conçues en fonction des ressources techniques et financières localement disponibles afin de garantir l'autonomie et la durabilité. La disponibilité limitée des données constitue une autre contrainte majeure.

Une approche descendante a été entreprise. Dans un premier temps, la consommation d'eau agricole a été abordée à l'échelle du bassin versant. Des stations hydrométriques ont été installées à des endroits stratégiques le long du cours d'eau, délimitant, d'un point de vue hydrologique, les différentes zones agricoles de la région. Des images satellites et aériennes ont été analysées pour produire une cartographie des terres agricoles. Pour les images satellites à haute résolution, une approche de classification objet basé plus complexe et coûteuse a été comparée à une approche simple de classification pixel basé. Comme on pouvait s'y attendre, la classification objet basé de

l'utilisation des terres a généré des données d'ensemble plus précises et un résultat plus réaliste. Les zones ayant la même hétérogénéité due à la présence d'arbres et d'arbustes ont été regroupées en objets et classifiées en fonction. Toutefois, ajoutées sous forme de bandes supplémentaires à l'imagerie, des matrices de cooccurrence du niveau de gris ont lissé l'image et permis ainsi d'intégrer l'information de l'hétérogénéité dans l'image. Une procédure de classification classique pixel basé appliquée sur une telle image recomposée a donné des résultats satisfaisants, nécessitant un logiciel moins spécialisé.

Une toute autre approche en matière d'acquisition d'images de télédétection a également été proposée. Des photographies aériennes à petite échelle ont été prises à partir d'un avion amateur localement disponible, muni d'un simple appareil panorama. Ces photographies aériennes ont été géoréférencées dans un environnement SIG. Cette technique locale est beaucoup moins coûteuse qu'une image satellite haute résolution similaire et moins sensible aux conditions atmosphériques qui perturbent souvent la prise d'images. L'utilisation des terres peut également être évaluée.

Ces cartes d'utilisation des terres, combinées aux données hydrologiques ont permis une estimation de l'efficacité de l'utilisation de l'eau au niveau des différentes zones irriguées. Il en résulte une carte objective indiquant l'utilisation efficace ou inefficace de l'eau dans certaines régions. Par ailleurs, la carte a confirmé les pratiques d'irrigation inefficaces des usagers de l'eau en amont et ses effets dévastateurs sur le périmètre irrigué plus en aval. Une fois que ces résultats ont été présentés et discutés avec la structure étatique de tutelle, des actions précises ont été entreprises : (i) aider le périmètre irrigué dans l'adoption d'un système de répartition plus équitable de ses ressources en eau qui ne cessent de diminuer, et (ii) intervenir dans les pratiques d'irrigation des petits agriculteurs en amont.

Une évaluation initiale de la distribution de l'eau au niveau du périmètre irrigué, autrefois géré par l'Etat, a confirmé la diminution croissante de l'eau disponible, accentuée par une distribution inégale de l'eau tout au long du périmètre irrigué. Les agriculteurs ont été entendus à plusieurs reprises et de meilleurs calendriers de distribution d'eau ont été élaborés à l'aide de SIMIS. Un partenariat public-privé a ainsi vu le jour pour garantir une gestion durable de l'eau d'irrigation. Le partenaire privé était chargé de la mise en place

opérationnelle du SIMIS après une formation intensive sur le tas organisée par le projet. Des calendriers ont été proposés aux agriculteurs et agents de l'état affectés sur le périmètre irrigué. La structure étatique de tutelle devait s'assurer que les nouvelles règles étaient suivies. Après plusieurs saisons, on pouvait noter une légère amélioration dans la distribution de l'eau et la fin de la dégradation du périmètre irrigué. Un fait important à noter reste la satisfaction des agriculteurs et leur acceptation de contribuer progressivement aux coûts de fonctionnement de ce partenariat public-privé.

Pour tenter de comprendre les rendements non optimaux et les calendriers d'irrigation inefficaces des petites parcelles irriguées de paysans en amont, des agents de vulgarisation, des agriculteurs et chercheurs ont uni leurs efforts pour une surveillance intensive de quelques champs individuels. La culture du chou a été choisie, mais les conclusions tirées sont également pertinentes pour d'autres cultures dans la région. Un modèle à l'échelle de la parcelle, AquaCrop, a été calibré et validé. Le modèle nécessite un nombre relativement restreint de données d'entrée explicites et intuitives. Une fois le modèle opérationnel, les résultats ont attiré la curiosité des agents de vulgarisation et des calendriers d'irrigation adaptés ont pu être élaborés. Cependant, à l'heure actuelle, la méthode pour transmettre ces résultats à des centaines d'agriculteurs reste toujours à définir clairement. AquaCrop doit être testé pour les autres principales cultures dans la région et des séances d'information devraient être organisées pour convaincre davantage les agents de vulgarisation.

La gestion de l'eau devient rapidement complexe lorsque des interventions sont nécessaires à différents niveaux, spatiaux et d'utilisateur, en particulier lorsqu'il existe des interactions entre ces différents niveaux. Les intervenants dans le bassin versant du Kou devaient relever ce défi. Dans un paysage agricole aussi complexe et hétérogène, où peu de données et ressources (humaines) sont disponibles, un cadre propice à l'utilisation facile et l'adaptation d'outils de gestion a été mis en place ; d'une échelle à une autre et d'un outil à un autre. Chaque outil est utilisé de manière indépendante, mais les résultats combinés contribuent à une gestion intégrée de l'eau.

Il est important de noter qu'avant cette étude, très peu de données étaient disponibles. Les décideurs étaient donc incapables de répondre aux plaintes

croissantes des petits et grands acteurs pour intervenir dans les conflits liés à l'eau. Actuellement, les données et les outils existent, et sont opérationnels et offrent des données et plans objectifs visant à aider les décideurs dans le cadre de la gestion et la résolution de ces conflits.

7.2 Perspectives

A la demande du Ministère de l'Agriculture, ce cadre a été répliqué dans d'autres bassins versants au Burkina Faso et rapidement les problèmes (oubliés) resurgissent : manque de données et de ressources humaines. Bien que peu de données soient nécessaires, leur collecte dure au moins deux saisons agricoles. En ce qui concerne les ressources humaines, il y a une nécessité de repartir à zéro pour les formations proposées ; en outre, les ressources (humaines) ne sont pas suffisantes dans les structures décentralisées de l'état et font souvent l'objet de beaucoup de sollicitation. Donc quelques suggestions doivent être faites.

Toutes les études menées dans le cadre de la présente étude n'ont pas besoin d'être reprises annuellement ; une fois mis à disposition, on peut facilement supposer que les résultats et plans restent fiables pendant un certain temps. Pour permettre à un plus large public d'avoir accès aux résultats et pour les années à venir, un site Web a été créé (www.ge-eau.org). Les manuels, articles, rapports et cartes peuvent y être téléchargés gratuitement.

Les structures centralisées de l'Etat (e.g. la Direction Générale de l'Aménagement et du Développement de l'Irrigation, DGADI), les centres nationaux de recherche (e.g. l'Institut National de l'Environnement et de Recherches Agricoles, INERA), les universités (e.g. l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)) et les opérateurs privés (e.g. l'Observatoire de l'Eau des Bassins versants du Mouhoun, de la Comoé et du Banifing, (OE)) pourraient et devraient jouer un rôle plus important dans le plaidoyer et l'ancrage de cette approche. Elles ont par ailleurs la capacité de diffuser ces résultats au niveau national et même de les intégrer dans les politiques nationales. Les universités forment les futurs décideurs et acteurs dans la GIRE. On rencontre leurs diplômés partout dans le pays, dans toutes les différentes structures étatiques et privées. Les structures centrales de l'Etat,

comme la DGADI, sont chargées de l'application de la Politique Nationale de Développement Durable de l'Agriculture Irriguée ; elles aident également les organismes publics décentralisés dans cette tâche. Cette politique nationale vise à : (i) promouvoir une utilisation durable des ressources naturelles, (ii) renforcer la gestion des aménagements hydro-agricoles existants et (iii) organiser la recherche et le développement, apporter son soutien/conseils et formation. La présente étude répond à ces objectifs. Si ces activités sont soutenues au niveau central, elles pourraient être mises en œuvre sous la responsabilité des structures publiques régionales et donc allant au-delà de « l'approche projet ». Il est également très utile d'insister sur le rôle que les opérateurs privés peuvent jouer. Depuis le début de cette recherche, l'OE a été étroitement associé au projet. Ses ingénieurs ont participé à la conception de la plupart des outils, mais leur rôle majeur a été la diffusion des résultats du projet auprès des différents acteurs.

Aujourd'hui, ils sont toujours présents dans le bassin versant du Kou, et continuent de surveiller la gestion de l'eau et donner des conseils. Ils ont également réussi à apporter leur expertise acquise à d'autres régions, comme par exemple dans le périmètre irrigué de la Vallée du Sourou dans le cadre d'un projet financé par l'USAID à travers le Millennium Challenge Account.

Cette approche peut sembler évidente : comprendre l'utilisation de l'eau au plan régional grâce à la télédétection et ensuite s'attaquer aux problèmes à des niveaux bien précis à l'aide d'outils d'aide à la décision. Il ressort cependant des échanges avec des collègues et autres experts en irrigation que les mêmes problèmes se posent et perdurent dans d'autres régions irriguées en Afrique du Nord et de l'Ouest ; il s'agit entre autres de « l'Office du Niger » au Mali, de la « Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des Vallées du fleuve Sénégal et de la Faléné » (SAED) au Sénégal et de la « Plaine de Tadla » au Maroc. Il est certain que le bassin versant du Kou est beaucoup plus petit que les régions irriguées mentionnées ci-dessus, mais la problématique reste comparable. De par sa petite taille, le bassin versant du Kou peut être considéré comme une plateforme de test idéale.

Beaucoup plus de données ont été collectées et plus d'outils conçus que ceux présentés dans la présente étude : des données climatiques, des profils

pédologiques et des études de sols, des études de suivi intensif sur le terrain, des études socio-économiques, des simulations de ruissellement, etc. Tout cela dans le but de produire une documentation exhaustive et bien comprendre la problématique posée. Enfin, seules les données les plus pertinentes et les approches adéquates ont été retenues dans le cadre de la présente étude. Cette approche peut maintenant être facilement adoptée pour d'autres régions (plus grandes). Après une évaluation des données disponibles, une étude de faisabilité pour l'implémentation de ces outils peut être faite relativement rapide. Si nécessaire des données supplémentaires sont à collecter, mais une collecte intensive des données n'est plus nécessaire.

References

- Aber, J.S., Marzolf, I., Ries, J.B., 2010. Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 268 p.
- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T.B.S., Singh, M., Pathak, H., Ahmad, T., 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55-66.
- Aggarwal, R.M., 2000. Possibilities and limitations to cooperation in small groups: the case of group-owned wells in Southern India. *World Development*, 28 (8), 1481-1497.
- Agüera, F., Aguilar, F.J., Aguilar, M.A., 2008. Using texture analysis to improve per-pixel classification of very high resolution images for mapping plastic greenhouses. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63, 635-646.
- Albernethy, C.L., Jinapala, K., Makin, I.W., 2001. Assessing the opinions of users of water projects. *Irrigation and Drainage*, 50, 173-193.
- Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome, Italy. 300 p.
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., Rahnama, A., 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100, 1-8.
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., Dejene, T., 2010a. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97, 1838-1846.
- Araya, A., Keesstra, S.D., Stroosnijder, L., 2010b. Simulating yield response to water of teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. *Field Crops Research*, 116, 196-204.
- Astrium, 2012. Astrium GEO-information services: SPOT international price list. <http://astrium-geo.com>. Accessed 03.05.2012.
- Baker, W.L., Honaker, J.J. and Weisberg, P.J., 1995. Using aerial photography and GIS to map Forrest-Tundra ecotone in Rocky Mountain National Park, Colorado, for global change research. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 313-320.
- Becu, N., Neef, A., Schreinemachers, P., Sangkapitux, C., 2008. Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potential and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy*, 25, 498-509.
- Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauch, G., Lingenfelder, I., Heynen, M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, 239-258.

- Bergez, J.E., Leenhardt, D., Colomb, B., Dury, J., Carpani, M., Casagrande, M., Charron, M.H., Guillaume, S., Therond, O., Willaume, M., 2012. Computer-model tools for a better agricultural water management: Tackling managers' issues at different scales – A contribution from systemic agronomists. *Computer and Electronics in Agriculture*, 86, 89-99.
- Blaschke, T., Lang, S., Lorup, E., Strobl, J., Ziel, P., 2000. Object-oriented processing in an integrated GIS/remote sensing environment and perspectives for environmental applications. In: Cremers, A., Greve, K. (Eds.), *Environmental Information for Planning, Politics and the Public*. Metropolis Verlag, Marburg, pp. 555-570.
- Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 2-16.
- Boggs, G.S., 2010. Assessment of SPOT 5 and QuickBird remotely sensed imagery for mapping tree cover in savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 217-224.
- Bolstad, P.V., 1992. Geometric errors in natural resource GIS data: tilt and terrain effects in aerial photographs. *Forest Science*, 38, 367-380.
- Bos, M.G., Nugteren, J., 1990. On irrigation efficiencies. ILRI Publication 19. Wageningen, The Netherlands. 120 p.
- Bunasols (Bureau National des Sols), 2002. Etude morpho-pédologique des provinces du Houet et du Tuy. Rapport Technique N° 126. Ministère de l'Agriculture, Ouagadougou, Burkina Faso. 75 p. + Annexes.
- Carberry, P., Gladwin, C., Twomlow, S., 2004. Linking simulation modelling to participatory research in smallholder farming systems. In: Delve, R.J., Probert, M.E., (Eds.), *Modelling Nutrient Management in Tropical Cropping Systems*. ACIAR Proceedings No. 114, Canberra, Australia. 34-46.
- Carmel, Y., Flather, C., Dean, D., 2006. A methodology for translating positional error into measures of attribute error, and combining the two error sources. *Proceedings, 7th international symposium on spatial accuracy assessment in natural resources and environmental sciences*, Lisbon, Portugal, pp. 3-17.
- Carreiras, J.M.B., Pereira, J.M.C., Pereira, J.S., 2006. Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 223, 45-53.
- CartoTalk, 2012. Aerial Image Stitching along with GIS. www.cartotalk.com. Accessed 03.09.2012.
- Castilla, H., Hay, G.J., 2008. Image objects and geographic objects. In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.J. (Eds), *Object-based image analysis*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany. pp. 91-110. Available at http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-77058-9_5 Accessed 02.12.2013.
- Castillejo-González, I.L., López-Granados, F., García-Ferrer, A., Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., de la Orden, M.S., González-

- Audicana, M., 2009. Object- and pixel-based analysis for mapping crops and their agro-environmental associated measures using QuikBird imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68, 207-215.
- Cawley, G.C. and Talbot, N.L.C., 2003. Efficient leave-one-out cross-validation of kernel fisher discriminant classifiers. *Pattern Recognition*, 36 (11), 2585-2592.
- Chen, D., Stow, D.A., 2002. The effect of training strategies on supervised classification at different spatial resolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 1155-1162.
- Chen, D., Stow, D.A., Gong, P., 2004. Examining the effect of spatial resolution and texture window size on classification accuracy: an urban environment case. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 2177-2192.
- Cleve, C., Kelly, M., Kearns, F.R., Moritz, M., 2008. Classification of the wildland-urban interface: a comparison of pixel- and object-based classifications using high-resolution aerial photography. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32, 317-326.
- Congalton, R. G., Green, K., 2009. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA. 183 p.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E., 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 25 (9), 1565-1596.
- De Leeuw, A.J., Veugen, L.M.M. and Van Stokkom, H.T.C., 1988. Geometric correction of remotely-sensed imagery using ground control points and orthogonal polynomials. *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1751-1759.
- Deligios, P.A., Farci, R., Sulas, L., Hoogenboom, G., Ledda, L., 2013. Predicting growth and yield of winter rapeseed in a Mediterranean environment: Model adaptation at a field scale. *Field Crops Research*, 144, 100-112.
- Dembele, Y., 1991. Etude des besoins en eau du riz irrigué dans différentes conditions pédoclimatiques du Burkina Faso. Actes semin. intern. 'L'influence du climat sur la production des cultures tropicales', Ouagadougou (Burkina Faso), 23-28 sept. 1991, CTA Wageningen (Pays-Bas), ISESCO Rabat (Maroc). pp. 118-127.
- Dembele, Y., Yacouba, H., Keita, A., Sally, H., 2011. Assessment of irrigation system performance in south-western Burkina Faso. *Irrigation and Drainage*, 50 (4), 309-321.
- de Wit, C.T., 1958. Transpiration and crop yields. *Agricultural Research Reports* 64(6). Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 88 p.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O., 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper N° 24*. FAO, Rome, Italy. 144 p.

- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 33, Rome, Italy, 193 p.
- Duro, D.C., Franklin, S.E., Dubé, M.G., 2012. A comparison of pixel-based and object-based image analysis with selected machine learning algorithms for the classification of agricultural landscapes using SPOT-5 HRG imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 259-272.
- El Hajj, M., Bégué, A., Guillaume, S., Martiné, J.F., 2009. Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices – the case of sugarcane harvest on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 113, 2052-2061.
- ERDAS, 2002. IMAGINE OrthoBASE user's guide. ERDAS INC., Atlanta, USA. 484 p.
- FAO, 1997. Irrigation potential in Africa: a basin approach. FAO Land and Water Bulletin N° 4. FAO, Rome, Italy. 177 p.
- FAO, 2001. Lecture notes on the major soils of the world. World Soil Resources Reports N° 94. FAO, Rome, Italy. 334 p.
- FAO, 2002. World agriculture: towards 2015/2030. FAO, Rome, Italy. 106 p.
- FAO, 2009. ET0 calculator version 3.1. In: Evapotranspiration from Reference Surface, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy. 38 p.
- Foody, G.M., 2000. Estimation sub-pixel land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 26, 469-478.
- Foody, G. M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80, 185-201.
- Gavin, C.C., Talbot, N.L.C., 2003. Efficient leave-one-out cross-validation of kernel fisher discriminant classifiers. *Pattern Recognition*, 36 (11), 2585-2592.
- Geerts, S. and Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96 (9), 1275-1284.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., Steduto, P., 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101 (3), 499-508.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management*, 98, 213-216.
- Giordano, R., Passarella, G., Uricchio, V.F., Vurro, M., 2007. Integrating conflict analysis and consensus reaching in a decision support system for water resource management. *Journal of Environmental Management*, 84, 213-228.
- Gonsamo, A., 2010. Leaf area index retrieval using gap fractions obtained from high resolution satellite data: Comparisons of approaches, scales and atmospheric effects. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, 233-248.

- Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J., 2001. *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics. Springer, NY, USA. 745 p.
- Heller, E., Rhemtulla, J. M., Lele, S., Kalacska, M., Badiger, S., Sengupta, R., Ramankutty, N. 2012. Mapping Crop Types, Irrigated Areas, and Cropping Intensities in Heterogeneous Landscapes of Southern India Using Multi-Temporal Medium-Resolution Imagery: Implications for Assessing Water Use in Agriculture. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78 (8), 815-827.
- Hill, R.W., Allen, R.G., 1996. Simple irrigation calendars: a foundation for water management. In: Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO) (Ed.), *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. Rome, Italy. pp. 69-74.
- Hsiao, T.C. and Bradford K.J., 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. In: Taylor, H.M., W.R. Jordan and T.R. Sinclair (eds.), *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, USA, pp. 227-265.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response of water: III. Parameterization and testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101 (3), 448-459.
- Hu, Z, F. He, J, Yin, X. Lu, S. Tang, L. Wang and X. Li, 2007. Estimation of Fractional Vegetation Cover Based on Digital Camera Survey Data and a Remote Sensing Model. *Journal China University of Mining and Technology*, 17 (1), 116-120.
- Hubert-Moy, L., Cotonnec, A., Du, L., Chardin, A., Perez, P., 2001. A comparison of parametric classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units. *Remote Sensing of Environment*, 75, 174-187.
- Hutley, L.B., Setterfield, S.A., 2008. Savanna. In: Jorgensen, S.E., Fath, B.D. (Eds.), *Encyclopedia of Ecology*, vol.4: Ecosystems, Elsevier, Oxford, UK. pp. 3143-3154.
- Institut International de l'Irrigation (IIMI), 1997. *Analyse-diagnostic et performances de cinq périmètres irrigués autour de barrages au Burkina Faso. Rapport Final – Tome 1. Projet Management de l'irrigation - Burkina Faso*. Ouagadougou, Burkina Faso. 273 p.
- IWACO/BERA, 1988. *Rapport final de la mission d'appui d'étude des prélèvements d'eau entre la Guinguette et la prise de Diaradougou. Projet Vallée du Kou – Mission Néerlandaise*. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 32 p. + Annexes.
- IWACO/BURGEAP, 1998. *Diagnostic des grands périmètres irrigués dans le sud-ouest du Burkina Faso : Vallée du Kou – Banzon – Karfiguéla. Tome 2 : Vallée du Kou. Programme RESO*, Burkina Faso. 47 p. + Annexes.
- Jacqueminet, C., Kermadi, S., Michel, K., Gagnage, M., Branger, F., Jankowsky, S., Braud, I., 2013. Land cover mapping using aerial and

- VHR satellite images for distributed hydrological modelling of periurban catchments: Application to the Yzeron catchment (Lyon, France). *Journal of Hydrology*, 485, 68-83.
- Jaffrain, G., Boussim, J., Diallo, A., Sidibe, N., Yago, D., Pare, F., 2005. Guide Technique de la Nomenclature de la Base de Données d'Occupation des Terres (BDOT), Burkina Faso. In: Technical Report, Institut Géographique du Burkina (IGB), Ouagadougou, Burkina Faso, p. 40.
- Jahromi, S.S. and Feyen, J., 2001. Spatial and temporal variability performance of the water delivery in irrigation schemes. *Irrigation and drainage Systems*, 15, 215-233.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R., 1991. A test of computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27, 337-350.
- Jensen, J.R., 2005. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*, 3rd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA. 526 p.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265.
- Kadmon, R. and Harari-Kremer, R., 1999. Studying long-term vegetation dynamics using digital processing of historical aerial photographs. *Remote Sensing of Environment*, 68, 164-176.
- Kardoulas, N.G., Bird, A.C., Lawan, A.I., 1996. Geometric correction of SPOT and Landsat imagery: a comparison of map- and GPS-derived control points. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62 (10), 1173-1177.
- Kazbekov J., Abdullaev, I., Manthrithilake, H., Qureshi, A., 2009. Evaluating planning and delivery performance of Water User Associations (WUAs) in Osh Province, Kyrgyzstan. *Agricultural Water Management*, 96, 1259-1267.
- Kersten, G. and Concilio, G., 2002. *Information Technologies for Environmental Decision Making in Networked Societies*. <http://interneg.concordia.ca/views/bodyfiles/paper/2002/04.pdf>. Accessed 02.12.2013. 29 p.
- Khalkheili, T.A. and Zamani, G.H., 2009. Farmer participation in irrigation management: The case of Doroodzan Dam Irrigation Network, Iran. *Agricultural Water Management*, 96, 859-865.
- Kressler, F.P., Bauer, T.B., Franzen, M., 2005. Object-oriented classification of orthophotos to support update of spatial databases. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International, 1, 1-4.
- Lahcen O., 2000. *Exploitation et entretien des réseaux d'irrigation du périmètre irrigué de la Vallée du Kou*. Programme spécial pour la sécurité alimentaire, FAO-Maroc-Burkina Faso. 52 p.

- Land Info, 2012. High-resolution satellite imagery. <http://www.landinfo.com>. Accessed 03.05.2012.
- Landis, J.R., Kock, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-174.
- Levine G., 1982. Relative Water Supply: an Explanatory Variable for Irrigation Systems. Technical Report N° 6. Cornell University, Ithaca, New York, USA.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W., 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley, NY, USA. 763 p.
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models; overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 51-73.
- Lozano, D. and Mateos, L., 2008. Usefulness and limitations of decision support systems for improving irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, 95, 409-418.
- Lucas, R., Rowlands, A., Brown, A., Keyworth, S., Buntin, P., 2007. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 165-185.
- Lunetta, R.S. and Elvidge, C.D., 1998. Remote sensing change detection: Environmental monitoring methods and applications. Ann Arbor Press, Chelsea, Michigan, USA. 318 p.
- Luscier, J.D., W.L. Thompson, J.M. Wilson, B.E. Gorham and L.D. Dragut, 2006. Using digital photographs and object-based image analysis to estimate percent ground cover in vegetation plots. *Frontiers in Ecology and Environment*, 4 (8), 408-143.
- Mateos, L., Lopez-Cortijo, I., Sagardoy, J.A., 2002. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, 56 (3), 193-206.
- Maxim, L.D., Harrington, L. and Kenndy, M., 1981. Alternative scale up estimators for aerial surveys where both detection and classification errors exist. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47 (8), 1227-1239.
- Meinzen-Dick, R., Raju, K.V., Gulati, A., 2002. What affects organization and collective action for managing resources? Evidence from canal irrigation systems in India. *World Development*, 30 (4), 649-666.
- Mermoud, A., Tamini, T.D., Yacouba, H., 2005. Impacts of different irrigation schedules on the water balance of an onion crop in a semi-arid zone. *Agricultural Water Management*, 77, 282-295.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Elevage, 1985. Coûts d'exploitation de la culture des choux au Burkina Faso, Fiche technique. www.greenstone.org Accessed 02.12.13. 11 p.

- Mhkabela, M.S., Bullock, P.R., 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16-24.
- Molden D.J. and Gates, T.K., 1990. Performances measures for evaluation of irrigation water delivery systems. *Journal of Irrigation and Drainage*, 116, 804-823.
- Moran, E.F., 2010. Land cover classification in a complex urban-rural landscape with Quicbird imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 76 (10), 1159-1168.
- Morgan, J.L., Gergel, S.E., Coops, N.C., 2010. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. *BioScience*, 60 (1), 47-59.
- Mumby, P.J., Green, E.P., Edwards, A.J. and Clark, C.D., 1999. The cost-effectiveness of remote sensing for tropical coastal resources assessment and management. *Journal of Environmental Management*, 55 (3), 157-166.
- Myint, S.W., Gober, P., Brazel, A., Grossma-Clarke, S., Weng, Q., 2011. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1145-1161.
- Nelson, E.N., 2011. Performance indicators for irrigation canal system managers or water users associations. www.inpim.org. Accessed 02.12.2013. 12 p.
- New House Internet Services B.V., 2010. PTgui: Panorama Tools graphical user interface. <http://www.ptgui.org> Accessed 02.12.13.
- NIST/SEMATECH, 2012. e-Handbook of Statistical Methods, www.itl.nist.gov/div898/handbook/. Accessed 02.12.13.
- Nitcheu, M.N., Midekor A., Sawadogo, B., Wellens, J., 2010. Rapport campagnes de suivi des rendements à la Vallée du Kou: saison humide 2009 et saison sèche 2010. www.ge-eau.org. Accessed 02.12.2013. 11 p.
- Nkhoma B.G., Wapulumuka O., Mulwafu, O., 2004. The experience of irrigation management transfer in two irrigation schemes in Malawi, 1960s-2002. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 1327-1333.
- Oberthür, T., Cock, J., Andersson, M.S., Naranjo, R.N., Castañeda, D. and Blair, M., 2007. Acquisition of low altitude digital imagery for local monitoring and management of genetic resources. *Computers and electronics in agriculture*, 58, 60-77.
- Ouedraogo S., 1993. Analyse économique de l'allocation des facteurs de production dans les exploitations rizicoles de la Vallée du Kou. CNRST/INERA. Ouagadougou, Burkina Faso. 61 p.
- Ouedraogo, M., 2010. Etude socio-économique sur les utilisateurs agricoles des ressources en eau du Kou : Cas de la zone agricole située entre Nasso et Diaradougou. Projet GEeau, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 46 p.
- Ouyang, Z.T., Zhang, M.Q., Xie, X., Shen, Q., Guo H.Q., Zhao, B., 2011. A comparison of pixel-based and object-oriented approaches to VHR imagery for mapping saltmarsh plants. *Ecological Informatics*, 6, 136-146.

- Ozdogan, M., Gutman, G., 2008. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: An application example in the continental US. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3520-3537.
- Patterson, P.L. and Williams, M.S., 2003. Effects of registration errors between remotely sensed and ground data on estimators of forest area. *Forest Science*, 49, 110-118.
- Peña-Barragán, J.M., Jurado-Expósito, M., López-Granados, F., Atenciano, S., Sánchez-de la Orden, M., García-Ferrer, A. and García-Torres, L., 2004. Assessing land-use in olive groves from aerial photographs. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103, 117-122.
- PRLog, 2009. Volume Digitization of Maps and Aerial Photographs. www.prlog.org. Accessed 03.09.2012.
- Raal, P.A. and Burns, M.E.R., 1996. Mapping and conservation importance rating of South African coastal vegetation as an aid to development planning. *Landscape and Urban Planning*, 34, 389-400.
- Rabatel, G., Delenne, C. and Deshayes, M., 2008. A non-supervised approach using Gabor filters for vine-plot detection in aerial images. *Computers and Puisselectronics in agriculture*, 2008, 159-168.
- Raes, D., Sahli, A., Van Looij, J., Ben Mechlia, N., Persoons, E., 2000. Charts for guiding irrigation in real time. *Irrigation and Drainage Systems*, 14, 343-352.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E., 2009. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. *Journal of Agronomy*, 101, 438-447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, D., 2011. AquaCrop – The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual. www.fao.org/nr/water/aquacrop.html Accessed 02.12.13.
- Raiffa, H., Richardson J., Metcalfe, D., 2007. *Negotiation Analysis: The Science and Art of Collaborative Decision Making*. Harvard University Press, Cambridge, MA. 576 p.
- RapidEye, 2012. Satellite imagery product pricelist. <http://rapideye.net>. Accessed 03.05.2012.
- Rembold, F., Carnicelli, S., Nori, M. and Ferrai, G.A., 2000. Use of aerial photographs, Landsat TM imagery and multidisciplinary field survey for land-cover change analysis in the lakes region (Ethiopia). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2 (3-4), 181-189.
- Richards, J.A., 2013. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany. 494 p.
- Rocchini, D., Di Rita, R., 2005. Relief effects on aerial photos geometric correction. *Applied Geography*, 25, 159-168.
- Rogan, J., Franklin, J., Robers, D.A., 2002. A comparison of methods for monitoring multitemporal vegetation change using Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80, 143-156.

- Rosak, A., Latty, C., Pascal, V., Laubier, D., 2004. From Spot 5 to Pleiades HR: evolution of the instrumental specifications. In: Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics (ISCO) 2004, 30 March-2 April 2004, Toulouse, France, pp. 141-148.
- Ruelland, D., Levvasseur, F., Tribotté, A., 2010. Patterns and dynamics of land-cover changes since the 1960s over three experimental areas in Mali. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 511-517.
- Sarkar, S., Biswas, M., Goswami, S.B., Bandyopadhyay, P.K., 2010. Yield and water use efficiency of cauliflower under varying irrigation frequencies and water application methods in Lower Gangetic Plain of India. *Agricultural Water Management*, 97, 1655-1662.
- Sargardoy, J.A., Pastore, G., Yamashita, I., López-Cortijo, I., 2001. SIMIS: Scheme Irrigation Management Information System. Version 2.0 for Windows. FAO Land and Water Digital Media Series No. 6. FAO, Rome, Italy.
- Sakthivadivel, R., Merrey, D.J., Fernando, N., 1993. Cumulative relative water supply: a methodology for assessing irrigation system performance. *Irrigation and Drainage Systems*, 7, 43-67.
- Shaban, M.A., Dikshit, O., 2001. Improvement of classification in urban areas by the use of textural features: the case study of Lucknow city, Uttar Pradesh. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 565-593.
- Siebert, S., Henrich, V., Frenken K., Burke J., 2013. Global Map of Irrigation Areas version 5. Rheinische Friedrich-Wilhelms-University, Bonn, Germany / Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/index.stm>. Accessed 02.12.13.
- Singh, A., 1989. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sense data. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 3435-3456.
- Smith, M., 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. *Irrigation and Drainage Paper 46*. FAO, Rome, Italy. 126 p.
- Steduto, P.E., T.C. Hsiao and E. Fereres, 2007. On the conservative behaviour of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25 (3), 189-207.
- Steduto, P. Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop – The FAO crop model to simulate yield response to water. I. Concepts and underlying principles. *Journal of Agronomy*, 101, 426-437.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Fereres, E. Raes, D., 2012. Crop yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper N° 66*. Rome, Italy. 500 p.
- Stow, D., Hamada, Y., Coulter, L., Anguelova, Z., 2008. Monitoring shrubland habitat changes through object-based change identification with airborne multispectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1051-1061.

- Subramanian, A., Jagannathan, N.V., Meinzen-Dick, R., 1997. User Organizations for Sustainable Water Services. World Bank Technical Paper No. 354. The World Bank, Washington, D.C.. 155 p.
- Tiwari, K.N., Singh, A., Mal, P.K., 2003. Effect of drip irrigation on yield of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata*) under mulch and non-mulch conditions. *Agricultural Water Management*, 58, 19-28.
- Tormos, T., Kosuth, P., Durrieu, S., Villeneuve, B., Wasson, J.G., 2011. Improving the quantification of land cover pressure on stream ecological status at the riparian scale using high spatial resolution imagery. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 549-559.
- Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Gurney, C., McManus, J., 1992. The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 1054-1060.
- Traoré, F., 2012. Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles. Ph. D. Dissertation, Université de Liège, Liège, Belgium. 163 p. + Annexes.
- Traoré, F., Cornet, Y., Denis, A., Wellens, J., Tychon, B., 2013. Monitoring the evolution of irrigated areas with Landsat images using backward and forward change detection analysis in the Kou watershed, Burkina Faso. *Geocarto International*, 28 (8), 733-752.
- Trimble, 2010. eCognition Developer 8.64.0 - user guide. Trimble, Munich, Germany. 236 p.
- Unal, H.B., Asik, S., Avci, M., Yasar, S., Akkuzu, E., 2004. Performance of water delivery system at tertiary canal level: a case study of the Menemen Left Bank Irrigation System. *Agricultural Water Management*, 65 (3), 173-191.
- UNDP, 2007. Fiche technique pour la production de Chou Pommé au Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et Ressources Halieutiques. Ouagadougou, Burkina Faso. 9 p.
- Urama, 2005. Land-use intensification and environmental degradation: empirical evidence from irrigated and rain-fed farms in south eastern Nigeria. *Journal of Environmental Management*, 75 (3), 199-217.
- Uysal Ö. K. and Atiş, E., 2010. Assessing the performance of participatory management over time: a case study from Turkey. *Agricultural Water Management*, 97, 1017-1025.
- Valfrey, B. and Diallo, M., 2004. Etat des lieux et perspectives pour l'eau et l'assainissement: Burkina Faso. Livre Bleu. Le Secrétariat International de l'Eau, Montréal, Canada. 42 p.
- Vandersypen, K., Bengaly, K., Keita, A.C.T., Sidibe, S., Raes, D., Jamin, J.Y., 2006. Irrigation performance at tertiary level in the rice schemes of the Office du Niger (Mali): adequate water delivery through over-supply. *Agricultural Water Management*, 83, 144-152.
- Vermillion, D.L., 2000. Guide to monitoring and evaluation of irrigation management transfer. IIID/INPIM, USA. 71 p.

- Victoria, F.B., Viegas Filho J.S., Pereira, L.S., Teixeira, J.L., Lanna, A.E., 2005. Multi-scale modelling for water resources planning and management in rural basins. *Agricultural Water Management*, 77, 4-20.
- Wang, H. and Ellis, E.C., 2005. Image misregistration error in change measurements. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71, 1037-1044.
- Warner, W.S., Graham, R.W. and Read, R.E., 1996. Small format aerial photography. Whittles Publishing, UK. 348 p.
- Wellens, J. and Compaoré, N.F., 2003. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation. Rapport Annuel Nr. 1. K.U.Leuven, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. www.ge-eau.org. Accessed 02.12.2013. 123 p.
- Wellens, J., Diallo, M., Compaoré, N.F., Derouane, J., Tychon, B., 2007. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 1 (2005-2006). APEFE-WBI, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. www.ge-eau.org. Accessed 02.12.13. 128 p.
- Wellens, J., Diallo, M., Compaoré, N.F., Derouane, J., Tychon, B., 2009. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 2 (2007-2008). APEFE-WBI, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. www.ge-eau.org. Accessed 02.12.13. 131 p.
- Wellens, 2011. Elaboration des calendriers d'irrigation pour le périmètre irrigué de la Vallée du Kou à l'aide du logiciel SIMIS. www.ge-eau.org. Accessed 02.12.2013.
- Wellens, J., Denis, A., 2012. Fractional cover data retrieval using eCognition. www.ge-eau.org. Accessed 02.12.13. 7 p.
- Wellens, J. 2013 Renforcement des capacités à concevoir et à mettre en oeuvre des outils de gestion de l'eau à usage agricole - Burkina Faso www.ge-eau.org. Accessed 02.12.2013.
- Wellens, J., Traoré, F., Diallo, M., Tychon, B., 2013a. A framework for the use of decision-support tools at various spatial scales for the monitoring of irrigated agriculture in West-Africa. *Agricultural Sciences*, 4 (8A), 9-15.
- Wellens, J., Nitchou, M., Traoré, F., Tychon, B., 2013b. A public-private partnership experience in the management of an irrigation scheme using decision-support tools in Burkina Faso. *Agricultural Water Management*, 116, 1-11.
- Wellens, J., Raes, D., Traoré, F., Denis, A., Djaby, B., 2013c. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 127, 40-47.
- Wellens, J., Midekor, A., Traoré, F., Tychon, B., 2013d. An easy and low-cost method for preprocessing and matching small-scale amateur aerial photography for assessing agricultural land use in Burkina Faso.

- International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23, 273-278.
- Wentz, E.A., Stefanov, W.L., Gries C. and Hope, D., 2006. Land use cover mapping from diverse data sources for an arid urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30, 320-346.
- Whiteside, T.G., Boggs, G.S., Maier, S.W., 2011. Comparing object-based and pixel-based classification for mapping savannas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 884-893.
- Whitbread, A.M., Robertson, M.J., Carberry, P.S., Dimes, J.P., 2010. How farming systems simulation can aid the development of more sustainable smallholder farming systems in southern Africa. *European Journal of Agronomy*, 32, 51-58.
- Willmott, C.J., Akleson, G.S., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., Odonnell, J., Rowe, C.M., 1985. Statistic for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8895-9005.
- World Bank (2007). *Emerging Public-Private Partnerships in Irrigation Development and Management*. Water Sector Board Discussion Paper Series. Paper No. 10. The World Bank, Washington D.C., 50 p.
- Yang, C., Everitt, J.H., Murder, D., 2011. Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75, 347-354.
- Yoon, G.W., Cho, S.I., Chae, G.J., Par, J.H., 2005. Automatic land-cover classification of Landsat images using feature database in a network. *Proceedings of the IGARSS 2005 Symposium*, Seoul, Korea. 5 p.
- Yu, G., Gong, P., Clinton, N., Biging, G., Kelly, M., Schirokauer, D., 2003. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 72, 799-811.
- Zharikov, Y., Skilleter, G.A., Loneragan, N.R., Taranto, T., and Cameron, B.E., 2005. Mapping and characterizing subtropical estuarine landscapes using aerial photography and GIS for potential application in wildlife conservation and management. *Biological Conservation* 125, 87-100.
- Zhou, Q., Li, B., Sun, B., 2008. Modelling Spatio-Temporal Pattern of Landuse Change Using Multitemporal Remotely Sensed Imagery. In: *ISPRS Congress Beijing 2008*, 3 to 11 July 2008 2008 Beijing, China. 729-734.
- Zoungrana, M, and Kabaoré, M., 2009. Evolution du secteur agricole et des conditions de vie des ménages au Burkina Faso. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, Ouagadougou, Burkina Faso. 95 p.